

**Univerzita Karlova v Praze,
Přírodovědecká fakulta**

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky



Vývoj kalibračních metod pro hypoplastické modely

Development of calibration methods for hypoplastic models

Diplomová práce

Bc. Igor Šula

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. David Mašín, PhD.

Praha, 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne

.....
Podpis

Abstrakt

Na ČVUT, Stavební fakultě byla vyvinuta kalibrační aplikace ExCalibre, která dokáže automaticky zpracovat experimentální data a na jejich základě vytvořit sadu parametrů pro hypoplastické modely určené pro nasycené jíly nebo nasycené písky. Cílem této diplomové práce bylo podpořit vývoj kalibrační aplikace jejím testováním na reálných experimentálních sadách dat, jejichž automatická kalibrace byla v rámci této práce porovnávána s ručně kalibrovanými stejnými sadami experimentálních dat. Vývoj aplikace a její hlavní fáze testování probíhaly ve dvou etapách, kde byly zjištěny hlavní nedostatky kalibrací vytvořených kalibrační aplikací. Po finálním testování, kde byly odstraněny drobné nedostatky a chyby aplikace, které proběhly nad rámec této práce, vznikla uživatelsky příjemná webová aplikace (soilmodels.com/excalibre/). Výsledky z jednotlivých hlavních fází testů jsou v této práci diskutovány, stejně jako popis použitých databází jemnozrnných a hrubozrnných vzorku experimentálních sad, které pro vývoj a testování kalibrační aplikace posloužily. Znalost kalibrace modelu je klíčová pro jeho použití, proto lze v této práci nalézt popis užívaných konstitučních modelů, které jsou v kalibrační aplikaci používány, stejně jako postup při stanovení jejich parametrů. V rámci této práce proběhly laboratorní zkoušky na jílu z bílinských výsypek, při kterých byla měřena tuhost v oboru malých a velmi malých přetvoření. Tyto laboratorní experimenty bylo třeba zhotovit pro vývoj kalibrační aplikace. Na naměřených datech z experimentálních zkoušek byl následně kalibrován hypoplastický model s konceptem intergranulárních přetvoření.

Klíčová slova: hypoplasticita, konstituční model

Abstract

The calibration application named ExCalibre was developed at Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering. This application can automatically process experimental data and create set of parameters of hypoplastic models which are designed for saturated clays or sands. The aim of this master thesis was to support development of application for calibration with testing it on real experimental data sets. Automatic calibration of these data sets was compared with calibration by hand for identical data. The development of the application and main phase of testing took place in two stages, where the main calibration errors of calibration application were identified. After the final testing of application where the minor bugs and errors were overcome a user-friendly web application (soilmodel.com/excalibre/) was introduced. This final testing has gone beyond this thesis. The results from the main phases of testing are discussed in this thesis as well as the description of database of fine-grained and coarse-grained samples which were used to testing of application. Knowing the calibration of the model is crucial for its using, you can find description of the used constitutive models in this thesis, which are used in the calibration application, as well as a description of procedure for determining parameters of the models. During the creation of this thesis, laboratory tests were carried out on samples from dumps of Bílina. The stiffness in the range of small and very small strains was measured in these laboratory tests. These laboratory experiments were needed for development of calibration application. The hypoplastic model with intergranular strain concept was calibrated based on data from these experimental tests.

Key words: hypoplasticity, constitutive model

Poděkování

Rád bych velice poděkoval svému školiteli a vedoucímu diplomové práce doc. RNDr. Davidu Mašínovi, PhD., který mě svědomitě a s trpělivostí vedl správnou cestou, dával mi podmínky pro vylepšení mých schopností, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout, a v rámci spolupráce s kolegy s ČVUT mi byl oporou. Zároveň jsem rád, že mi dal příležitost spolupracovat na zajímavém problému, který je v této práci popsán a inicializoval můj nový koníček tvoření softwaru, který mi již několikrát velmi usnadnil život.

Rád bych poděkoval kolegům ze Stavební fakulty, ČVUT, hlavně Ing. Tomášovi Kadlíčkovi, za férové jednání při diskuzích o problémech kalibrační aplikace a jejich řešeních.

Rád bych poděkoval své úžasné rodině, která mi ve vypjatých chvílkách praktické části této práce byla psychickou a morální oporou, a bez které by vznik této práce nebyl možný.

OBSAH

1	ÚVOD A MOTIVACE PRÁCE	1
2	KONSTITUČNÍ MODELÝ	2
2.1	Konstituční model pro jemnozrnné zeminy	4
2.2	Konstituční model pro hrubozrnné zeminy	6
3	KALIBRACE KONSTITUČNÍCH MODELŮ	8
3.1	Kalibrace konstitučního modelu pro jemnozrnné zeminy	8
3.2	Kalibrace konstitučního modelu pro hrubozrnné zeminy.....	9
4	SADA JEMNOZRNNÝCH ZEMIN.....	12
4.1	Kalibrace sady jemnozrnných zemin	12
4.2	Rozšíření databáze jemnozrnných zemin	15
5	SADA HRUBOZRNNÝCH ZEMIN	21
5.1	Kalibrace sady hrubozrnných zemin.....	22
6	POSOUZENÍ KALIBRAČNÍ APLIKACE	26
6.1	První verze kalibrační aplikace.....	26
6.1.1	Automatická kalibrace jemnozrnných zemin	26
6.1.2	Automatická kalibrace hrubozrnných zemin	32
6.2	Druhá verze kalibrační aplikace	36
6.2.1	Automatická kalibrace jemnozrnných zemin	36
6.2.2	Automatická kalibrace hrubozrnných zemin	42
6.3	Finální verze kalibrační aplikace	46
7	KALIBRACE NA ZÁKLADĚ VLASTNÍCH EXPERIMENTÁLNÍCH DAT	51
7.1	Laboratorní experimenty na vzorku Bílina	51
7.1.1	Trojosá zkouška se snímači LVDT	52
7.1.2	Zkouška za použití bender elementů	55
7.2	Kalibrace konstitučního modelu pro obor velmi malých přetvoření.....	56
8	ZÁVĚR	58
9	POUŽITÉ ZDROJE	59

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Ukázka 1D hypoplastického modelu	3
Obr. 2.2: Ukázka odezvy 1D hypoplastického modelu s hysterezí.....	4
Obr. 2.3: Význam parametrů N , λ a κ v normalizované rovině (z Mašín, 2005)	5
Obr. 2.4: Limitující křivky čísel pórovitosti (z Herle a Gudehus, 1999)	7
Obr. 3.1: Zkouška sypného úhlu pro hrubozrnné zeminy (z Herle a Gudehus, 1999)	10
Obr. 3.2: Obrázek ukazující body oedometrické zkoušky, ze které se kalibrují parametry modelu h_s a n	11
Obr. 4.1: Grafy nakalibrovaných jemnozrnných sad, a) oedometrické zkoušky na rek. vzorku, b) oedometrické zkoušky na nep. vzorku, c) a d) nedrénované trojosé zkoušky na rek. vzorcích, e) a f) drénované trojosé zkoušky na rek. vzorcích.....	14
Obr. 4.2: Zrnitostní křivka sady Boston Blue Clay	17
Obr. 4.3: Zrnitostní křivka měkkého prachovitého jílu Koper	18
Obr. 4.4: Grafy digitalizovaných experimentálních sad, a) oedometrické zkoušky, b) zkoušky izotropního stlačení, c) a d) nedrénované trojosé zkoušky, e) a f) drénované trojosé zkoušky	20
Obr. 5.1: Pohled na písčnou stěnu v pískovně Kolný (ze Suchomel a Mašín, 2011).....	22
Obr. 5.2: Průběhy vybraných odběrů ze sady Kolný	24
Obr. 5.3: Grafy nakalibrovaných hrubozrnných sad, a) a b) drénované trojosé zkoušky na rek. vzorcích, c) oedometrické zkoušky na rek. vzorku	25
Obr. 6.1: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Bílina 46609, a) a b) nedrénovaná trojosá zkouška na rekonstituovaném vzorku, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku	28
Obr. 6.2: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Prackovice, a) a b) nedrénovaná trojosá zkouška na rekonstituovaném vzorku, c) a d) oedometrické zkoušky na rekonstituovaném vzorku	29
Obr. 6.3: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Senec, a) a b) nedrénovaná trojosá zkouška na rekonstituovaném vzorku, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku	30
Obr. 6.4: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Újezd pod Troskami, a) až d) drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích, e) a f) oedometrické zkoušky na rekonstituovaném vzorku	31
Obr. 6.5: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Dobřany, a) a b) drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku	34
Obr. 6.6: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Rohatec, a) a b) drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku	34

Obr. 6.7: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Hrušovany, a) a b) drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku	35
Obr. 6.8: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Bílina 46609 druhé verze, a) a b) nedrénovaná trojosá zkouška na rekonstituovaném vzorku, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku	37
Obr. 6.9: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Prackovice druhé verze, a) a b) nedrénovaná trojosá zkouška na rekonstituovaném vzorku, c) a d) oedometrické zkoušky na rekonstituovaném vzorku	38
Obr. 6.10: Srovnání první a druhé verze automatické pro neporušený vzorek ze sady Hájek	39
Obr. 6.11: Srovnání první a druhé verze automatické pro neporušený vzorek ze sady Bílina 47076.....	39
Obr. 6.12: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Metro 5A 36779 druhé verze, a) a b) nedrénovaná trojosá zkouška na rekonstituovaném vzorku, c) oedometrická zkouška na neporušeném vzorku	40
Obr. 6.13: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Újezd pod Troskami druhé verze, a) až d) drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích, e) a f) oedometrické zkoušky na rekonstituovaném vzorku	42
Obr. 6.14: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Dobřany druhé verze, a) a b) drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku	43
Obr. 6.15: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Rohatec druhé verze, a) a b) drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku	44
Obr. 6.16: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Hrušovany druhé verze, a) a b) drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku	45
Obr. 6.17: Vzhled úvodní stránky aplikace ExCalibre	46
Obr. 6.18: Vzhled stránky pro nahrání dat aplikace ExCalibre	47
Obr. 6.19: Průběh kalibrace experimentální sady v aplikaci ExCalibre	47
Obr. 6.20: Vzhled stránky s nakalibrovanými parametry z aplikace ExCalibre a oknem s možností re-kalibrace modelu	48
Obr. 6.21: Ukázka vzhledu graficky vyjádřené kalibrace v proložených experimentálních datech, a) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku, b) oedometrická zkouška na neporušeném vzorku, c) nedrénovaná triaxiální zkouška na rekonstituovaném vzorku, d) nedrénovaná triaxiální zkouška na neporušeném vzorku	49
Obr. 6.22: Vzhled stránky pro simulaci laboratorních experimentů, která je součástí aplikace ExCalibre	50
Obr. 7.1: Zrnitostní křivka vzorku Bílina 49714	51
Obr. 7.2: Vzorek Bílina 49714 osazený v komoře s LVDT snímači.....	52

Obr. 7.3: Vzorek Bílina po dokončení trojosé zkoušky a vysušení	54
Obr. 7.4: Výsledky trojosé zkoušky s LVDT snímači, a) experimentální data trojosé zkoušky s LVDT snímači q vůči ϵ_a , b) experimentální data trojosé zkoušky s LVDT snímači q vůči p, c) experimentální data pro měření 1. snímače LVDT, d) experimentální data pro měření 2. snímače LVDT	54
Obr. 7.5: Ukázka fázového posunu vysílané a přijímané vlny skrze vzorek	56
Obr. 7.6: Experimentální data z testu s bender elementy	56
Obr. 7.7: Výsledky kalibrace hypoplastického modelu pro jíly s konceptem intergranulárních přetvoření, a) měření 2. LVDT snímače, b) zkouška při použití bender elementů	57

SEZNAM TABULEK

Tabulka 4.1: Sada jemnozrnných vzorků	12
Tabulka 4.2: Parametry ruční kalibrace modelu pro jemnozrnné vzorky	15
Tabulka 4.3: Indexové veličiny daných experimentálních sad	19
Tabulka 5.1: Sada hrubozrnných vzorků	21
Tabulka 5.2: Parametry ruční kalibrace modelu pro hrubozrnné vzorky	23
Tabulka 6.1: Tabulka sad parametrů pro různé kombinace OED a CIUP	27
Tabulka 7.1: Výsledky z trojosé zkoušky s LVDT	53
Tabulka 7.2: Parametry pro vzorek Bílina 49714 pro měření tuhosti v oboru malých def.....	57

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

e číslo pórovitosti, $e = \frac{V_p}{V_s}$, kde V_p je objem pórů a V_s je objem pevné fáze

$\dot{\sigma}$ časová derivace napětí, $\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt}$

σ_a axiální napětí, vertikální napětí (σ_v), hlavní napětí (σ_{11})

σ_r radiální napětí, horizontální napětí (σ_h), hlavní napětí (σ_{33})

q deviátorové napětí, $q = \sigma_a - \sigma_r$

p střední napětí, $p = \frac{\sigma_a + 2\sigma_r}{3}$

p_r referenční napětí 1kPa

$\dot{\varepsilon}$ časová derivace přetvoření/deformace, $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$

ε_a axiální přetvoření/deformace, vertikální přetvoření (ε_v)

ε_r radiální přetvoření/deformace, horizontální přetvoření (ε_h)

ε_s smykové přetvoření/deformace, $\varepsilon_s = \frac{2(\varepsilon_a - \varepsilon_r)}{3}$

ε_v objemové přetvoření/deformace, $\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r$

NCL normal compression line

LVDT linear variable differential transformer

BENDER zkouška s použitím bender elementů

CID-NAT drénovaná triaxiální zkouška na neporušeném vzorku

CID-REC drénovaná triaxiální zkouška na rekonstituovaném vzorku

CIUP-NAT nedrénovaná triaxiální zkouška na neporušeném vzorku

CIUP-REC nedrénovaná triaxiální zkouška na rekonstituovaném vzorku

OED-NAT oedometrická zkouška na neporušeném vzorku

OED-REC oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku

1 ÚVOD A MOTIVACE PRÁCE

Motivací této diplomové práce byla spolupráce na projektu TAČR v jehož rámci byla práce definována. Projekt TAČR si dal za úkol vytvoření automatické kalibrační aplikace pro hypoplastické konstituční modely. Tyto modely slouží k charakterizaci mechanického chování jemnozrnných nebo hrubozrnných materiálů. Tato kalibrační aplikace byla vyvíjena na Stavební fakultě, ČVUT, kde byla kalibrační aplikace nazvána ExCalibre. Cílem této práce bylo posouzení kalibrační aplikace z hlediska její funkčnosti. Pro správné posouzení kalibrační aplikace bylo důležité mít a získat experimentální data, která byla následně pro kalibrace používána. Tato experimentální data se skládají z nejběžněji používaných experimentálních zkoušek z geotechnické praxe pro charakterizaci mechanického chování zemin. Experimentální sady zkoušek jsou pro kalibrování hypoplastických konstitučních modelů nezbytné.

Kalibrační aplikace byla hodnocena na základě porovnávání s ručně kalibrovanými experimentálními zkouškami z databáze experimentálních dat pro jemnozrnné i hrubozrnné vzorky zemin. V rámci spolupráce s kolegy Ing. Tomášem Jandou, Ph.D. a Ing. Tomášem Kadlíčkem ze Stavební fakulty, ČVUT proběhly celkem 3 fáze komplexních testů této kalibrační aplikace. Jak se ukázalo, tak kalibrační aplikace by do budoucna mohla být silným a rychlým nástrojem, který bude mít využití pro aplikace v hodnocení geotechnických staveb na základě jejich modelu. Kalibrační aplikace usnadňuje a urychluje kalibrační proces, bez kterého nelze daný model použít. Uživatel kalibrační aplikace má právo do výsledné simulace experimentálních zkoušek zasáhnout, a tudíž není zcela odstíněn od provedené výsledné kalibrace aplikací ExCalibre.

V této práci lze nalézt popis a shrnutí konstitučních hypoplastických modelů, které jsou v rámci práce a kalibrační aplikace využívány. V práci lze nalézt popis nesnadného procesu kalibrace těchto modelů, na základě něž lze získat sadu parametrů, jež charakterizuje mechanické chování použitého vzorku zeminy.

Dále jsou v práci popsány databáze jemnozrnných a hrubozrnných sad zemin, které byly pro účely hodnocení kalibrační aplikace používány. Dále je kalibrace konkrétních experimentálních sad diskutována a je představen proces jejich problematické kalibrace.

V závěru práce jsou popsány experimentální zkoušky na vzorku z bílinských výsypek (vzorek Bílina 49714), na kterých byla měřena tuhost v oboru malých a velmi malých přetvoření. Data z experimentálních zkoušek následně posloužila ke kalibraci hypoplastického konstitučního modelu s konceptem intergranulárních přetvoření. Koncept intergranulárních přetvoření společně s hypoplastickým modelem pro jíly, který tento koncept zahrnuje, je v práci představen a diskutován. Nakonec je popsán význam a postup kalibrace jednotlivých parametrů hypoplastického modelu s konceptem integranulárních přetvoření, který je určený pro jemnozrnné materiály.

2 KONSTITUČNÍ MODELY

Konstitučním modelem nebo vztahem je označována matematická závislost mezi deformací a stavovými veličinami materiálu. Těmito stavovými veličinami většinou bývá napětí, nejčastěji uvažované jako efektivní, jež je oproštěno od vlivu pórového tlaku. Napětí však není jedinou možnou uvažovanou stavovou veličinou, stavové veličiny obecně mohou představovat jakékoliv veličiny, které jsou měřitelné v čase. Stavové veličiny mají charakterizovat aktuální stav materiálu. Dalšími uvažovanými stavovými veličinami mohou být například číslo pórovitosti, stupeň nasycení či teplota (Herle, 2003).

Konstituční vztah je tedy matematická struktura, která se dá obecně vyjádřit jako:

$$(2.1) \quad \dot{\sigma} = h(\sigma, \varepsilon)$$

Kde σ je napětí, $\dot{\sigma}$ je časová derivace napětí, ε je časová derivace přetvoření a funkce h , závislá na stavových veličinách a změně přetvoření, představuje konstituční nebo materiálový model (Herle, 2003).

Materiálové modely uvažované pro kalibrační aplikaci jsou modely hypoplastické. Hypoplastické modely se od běžněji používaných elasto-plastických modelů odlišují hlavně svou matematickou strukturou. V jejich matematické struktuře je uvažováno pouze s celkovým přetvořením, namísto rozdělení přetvoření na elastická a plastická, jako tomu je v elasto-plastických modelech. Obecně se dá hypoplastický konstituční vztah vyjádřit rovnicí:

$$(2.2) \quad \dot{\sigma} = L\dot{\varepsilon} + N|\dot{\varepsilon}|$$

Kde L a N jsou tenzorové funkce napětí a jiných stavových proměnných, pro které platí, že $L > N > 0$ a $|\dot{\varepsilon}|$ je euklidovská norma časové derivace přetvoření, kterou lze vyjádřit jako $\dot{\varepsilon} = \sqrt{\dot{\varepsilon} : \dot{\varepsilon}}$.

Samotný hypoplastický model je definován pomocí tenzorů L a N . Součtem či rozdílem tenzorů L a N lze charakterizovat matici tuhosti. Pro přitížení (přírůstek přetvoření je kladný) je stanovena rovnicí 2.3 a pro odlehčení (přírůstek přetvoření je záporný) rovnicí 2.4.

$$(2.3) \quad \dot{\sigma} = (L - N)\dot{\varepsilon}$$

$$(2.4) \quad \dot{\sigma} = (L + N)\dot{\varepsilon}$$

Jak je vidět z rovnic 2.3 a 2.4, tak tuhost je rozdílná pro přitížení vzorku a jeho odlehčení. Tento fenomén je pozorován během experimentálních zkoušek při cyklickém zatěžování (Herle, 2003; Wu a Kolymbas, 2000).

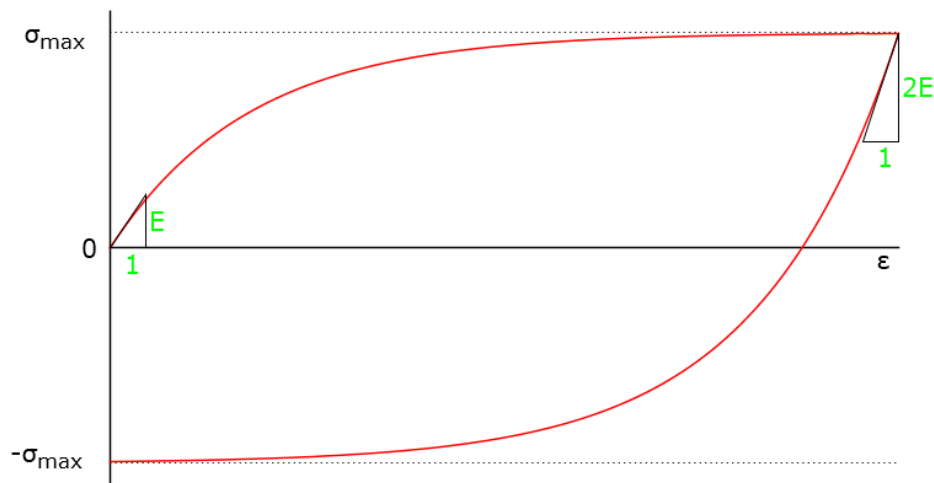
Jako ukázka chování hypoplastických modelů může posloužit 1D hypoplastický model (Mašín, 2017b) vyjádřený rovnicí:

$$(2.5) \quad \Delta\sigma = E \left[\Delta\varepsilon - \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \right) |\Delta\varepsilon| \right]$$

Kde $\Delta\sigma$ je změna napětí, $\Delta\varepsilon$ změna přetvoření a $|\Delta\varepsilon|$ je její absolutní hodnotou, E představuje tuhost, σ je aktuální napětí a σ_{\max} představuje maximální napětí, které je v aktuální zkoušce dosaženo, v tomto 1D hypoplastickém modelu je tenzor $L = E$ a tenzor $N = -E \frac{\sigma}{\sigma_{\max}}$.

Jak je vidět, tak tuhost je v přitěžovacím směru, kdy $\Delta\varepsilon$ je kladné, maximální v počátečním stavu a postupně se snižuje až do nuly. Směrnice E dosáhne nuly ve chvíli, kdy $\sigma = \sigma_{\max}$, čehož lze dosáhnout při nekonečném přetvoření.

V momentě, kdy v bodě maximálního napětí začneme náš test odlehčovat, resp. když $\Delta\varepsilon$ je záporné, tak je tuhost E dvakrát větší než v počátku testu. Tento fakt je vyobrazen v obr. 2.1, který má ilustrační charakter, a jsou v něm naznačeny velikosti směrnic tuhosti E v počátku a v místě maximálního napětí.



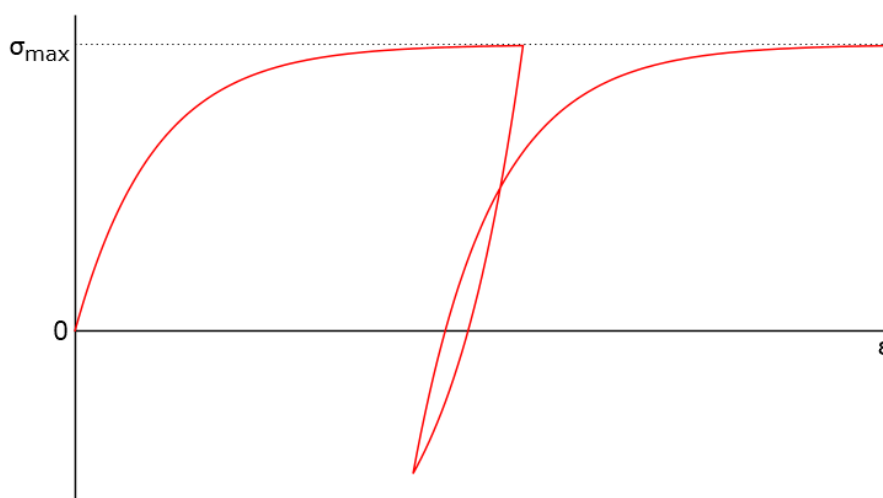
Obr. 2.1: Ukázka 1D hypoplastického modelu

Z této ukázky je patrné, že hypoplastické modely mohou pomocí jednodušší matematické struktury, naznačené v rovnici (2.5), charakterizovat typické nelineární chování zemin a není zapotřebí samostatných definic chování modelu pro část elastickou a plastickou, tak jak tomu bývá v elasto-plastických modelech (Mašín, 2017b).

Hypoplastické modely jsou podobně jako elasto-plastický model Cam-jílu založeny na asymptotických stavech. Tohoto stavu zemina při dlouhodobém zatěžování přirozeně

dosahuje. Typickým příkladem asymptotických stavů je kritický stav (CSL), normální čára stlačení (NCL) nebo oedometrická čára stlačení (K_0 NCL).

Hypoplastické modely svou jednodušší matematickou strukturou dokáží simulovat vrcholový stav a porušení v trojosých zkouškách, stejně jako povrcholové změkčení, kritický stav, dilatanci vzorku, chování během stlačení, hysterezní chování zeminy v cyklických testech (obr. 2.2), závislost tuhosti na napětí, kritické stavy zeminy, a to díky menšímu počtu parametrů modelu než např. koncepčně složitější kinematické (tzv. *bubble*) elasto-plastické modely (Mašín, 2017b).



Obr. 2.2: Ukázka odezvy 1D hypoplastického modelu s hysterezí

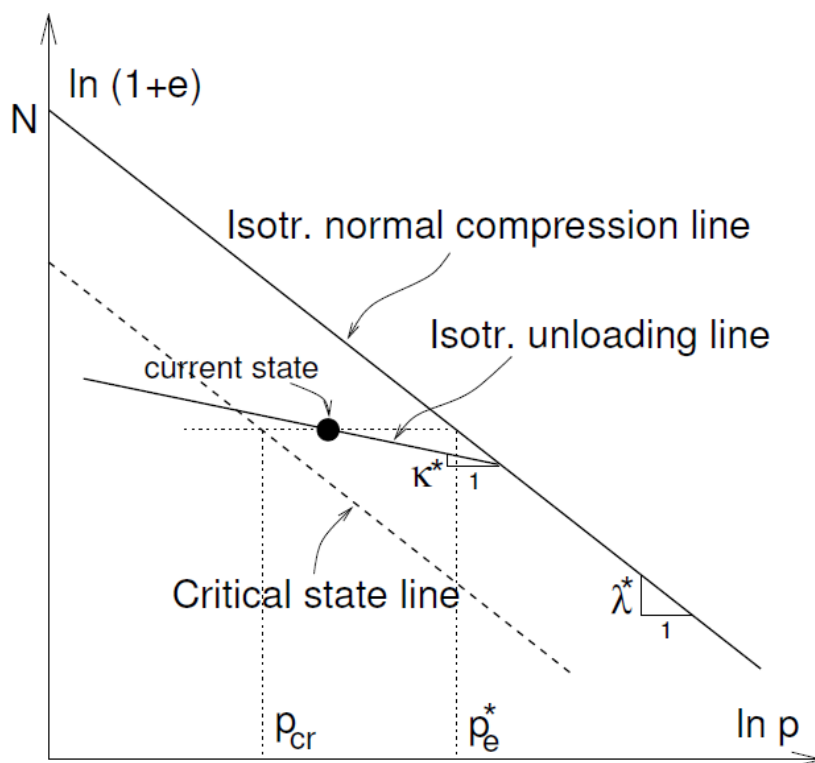
2.1 Konstituční model pro jemnozrnné zeminy

Hypoplastický konstituční model pro jemnozrnné zeminy, který je používán v této práci, byl vyvinut Mašínem (2013a), který představuje vylepšenou verzi původního modelu od Mašína (2005). Tato vylepšení se týkají hlavně tvaru asymptotické mezní plochy, která vymezuje přípustné stavy zeminy a svým tvarem definuje nepřípustné stavy (více v Mašín, 2013a). Tento model je zároveň součástí dalších pokročilejších hypoplastických modelů, např. Hydromechanického hypoplastického modelu pro bobtnavé jíly (Mašín, 2013b) nebo v Termo-hydromechanickém hypoplastickém modelu pro bobtnavé jíly (Mašín, 2017a). HM a THM hypoplastické modely pro expanzivní jíly simulují komplexní chování bentonitových materiálů v podmínkách uvažované inženýrské bariéry jaderných uložišť. Hypoplastický model pro nasycené jíly figuruje v HM a THM hypoplastických modelech jako součást, jež má za úkol simulovat mechanickou odezvu bentonitu (více v Mašín, 2013b a Mašín, 2017a).

Představený model je založen na principech hypoplasticity, rozlišuje mezi stavovými veličinami a materiálovými parametry. Materiálové parametry bývají v jakémkoliv stavu

zeminy konstantní a definují simulace hypoplastického modelu. Hypoplastický konstituční model uvažuje s pevnostní závislostí na aktuálním efektivním napětí a objemu vzorku, které je reprezentováno číslem pórovitosti. V hypoplastickém modelu pro nasycené jemnozrnné zeminy je zároveň zakomponován vliv tuhosti, jejíž velikost se mění se směrem přitěžování a vzdálenosti od počátku dráhy, jak bylo ukázáno v kap. 2. Přestavený konstituční hypoplastický model vyžaduje pro svou celkovou definici počáteční a konečný stav, které jsou vyjádřeny počátečním číslem pórovitosti a pozicí napětí, a zároveň je pro jeho plnou definici potřebné stanovit 5 materiálových parametrů.

Parametry N , λ a κ jsou definovány v rovině $\ln(p)$ vůči $\ln(1+e)$. V této představené rovině určují parametry N a λ pozici a směrnici normálně kompresní linie stlačení (NCL), tato linie definuje konečný a možný stav, po níž se může zemina pohybovat při nekonečném stlačování. Parametr κ představuje směrnici odlehčovací nebo znovu přitěžovací větve v počátcích ohledčování. Směrnice κ není v průběhu simulace konstantní a její velikost je závislá na vzdálenosti od NCL a aktuálním napětí, proto ji nelze přímo stanovit z experimentálních dat, jako v případě parametrů N a λ . Význam těchto tří parametrů dobře ilustruje obr. 2.3.



Obr. 2.3: Význam parametrů N , λ a κ v normalizované rovině (z Mašín, 2005)

Dalšími dvěma zbývajících parametry hypoplastického modelu pro jíly jsou φ_c a v . Parametr φ_c představuje kritický úhel vnitřního tření. Kritický úhel vnitřního tření lze charakterizovat pomocí úhlu přirozené sklonitosti, jako je to v případě hypoplastického modelu pro písky. Charakterizace je řešena díky mobilizovanému úhlu vnitřního tření, který

Lze určit z experimentálních dat. Úhel φ_c charakterizuje kritický stav, který představuje jeden z asymptotických stavů, jež zemina po určité míře zatížení přirozeně dosáhne. Kritický stav nebo kritickou pevnost lze charakterizovat jako pevnost, kdy začne docházet v materiálu k přirozenému tečení a kdy je změna napětí rovna nule. Parametr v ovlivňuje smykový modul v rovině q vůči ε_s . Modul samotný je ovšem během simulace nelineární a jeho velikost závisí na směru přitěžování (Mašín, 2013a; Mašín, 2005).

2.2 Konstituční model pro hrubozrnné zeminy

Druhým konstitučním hypoplastickým modelem, který je používán pro modelování chování hrubozrnných materiálů, je model vyvinutý von Wolffersdorffem (1996). Hypoplastický model pro hrubozrnné materiály byl hodnocen Herlem a Gudehusem (1999), kteří v jejich práci model kalibrují a navrhují postup, jak ke kalibraci modelu přistoupit.

Podobně jako konstituční hypoplastický model pro simulaci jílových materiálů od Mašína (2013a), je tento model založen na principech hypoplasticity. Hypoplastický model rozlišuje mezi stavovými proměnnými a materiálovými veličinami a velikost tuhosti je řízena směrem přitěžování (pritěžování nebo odlehčování). Pro celkovou definici konstitučního hypoplastického modelu pro hrubozrnné materiály je zapotřebí stanovit celkem 8 materiálových parametrů a samozřejmě stanovit počáteční stav materiálu na začátku simulace, který představuje jeho hustotu (reprezentováno číslem pórovitosti e) a počáteční napjatosti vzorku.

Parametr φ_c je úhel vnitřního tření v kritickém stavu, který je nejsnáze charakterizován jako tzv. sypaný úhel. Úhel přirozené sklonitosti lze snadno stanovit pro hrubozrnné materiály a zároveň slouží jako dobrá charakteristika kritického úhlu vnitřního tření. Tento úhel definuje kritický stav, kde po dostatečné době smykání vzorku začne docházet k přirozenému tečení a více nedochází ke změnám napětí.

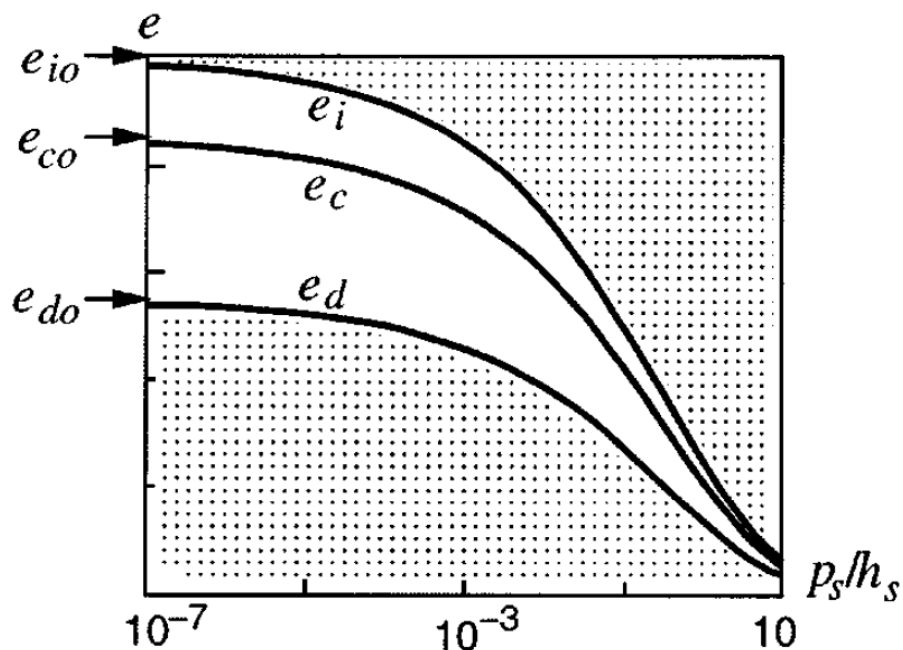
Velmi důležitou složkou hypoplastického modelu pro písky představuje koncept limitujících křivek čísel pórovitosti. Tento koncept předpokládá, že existují tři křivky, které vymezují pole přípustných čísel pórovitosti od minimálních po maximální čísla pro daný stav materiálu. Tyto křivky existují celkem tři: křivka e_i představuje maximální možné číslo pórovitosti, křivka e_d představuje naopak minimální možné číslo pórovitosti a křivka e_c představuje číslo pórovitosti dosaženého v kritickém stavu. Představené křivky jsou vyobrazeny v obr. 2.4. Tyto limitující křivky jsou řízeny parametry e_{i0} , e_{d0} , e_{c0} , h_s a n .

Jak je vidět z obr. 2.4, tak parametry e_{i0} , e_{d0} a e_{c0} představují počáteční čísla pórovitosti pro jednotlivé limitující křivky čísel pórovitostí zakomponované v hypoplastickém modelu pro písky.

Parametry h_s a n jsou parametry kontrolující sklon a tvar nebo zakřivení všech těchto limitujících křivek, a to díky vztahu vyjádřeného v rovnici:

$$(2.6) \quad e^{-\left(\frac{-tr(\sigma)}{h_s}\right)^n} = \frac{e_i}{e_{i0}} = \frac{e_d}{e_{d0}} = \frac{e_c}{e_{c0}}$$

Kde e je eulerovo číslo, $tr(\sigma)$ je stopa napětí, vyjádřená jako $tr(\sigma) = \sigma : 1$, e_i , e_d a e_c jsou čísla pórovitostí na limitujících křivkách čísel pórovitosti a h_s , n , e_{i0} , e_{d0} a e_{c0} jsou parametry modelu.



Obr. 2.4: Limitující křivky čísel pórovitosti (z Herle a Gudehus, 1999)

Posledními dvěma zbývajícími parametry hypoplastického modelu pro písky jsou parametry α a β . Pomocí parametru α je simulován vrcholový úhel vnitřního tření a parametrem β je kalibrována objemová a smyková tuhost. Díky těmto parametrům lze simulovat triaxiální smykové zkoušky.

3 KALIBRACE KONSTITUČNÍCH MODELŮ

Kalibrací modelu je myšlen proces, kdy na základě vlastních experimentálních dat z laboratoře a znalosti konstitučního modelu je snahou stanovit parametry modelu tak, aby model co nejlépe reprezentoval použitá experimentální data. Pro kalibrace a simulace zmíněných konstitučních modelů byla využívána aplikace „Triax element test driver“, který je dostupný na soilmodels.com/triax/.

3.1 Kalibrace konstitučního modelu pro jemnozrnné zeminy

Pro kalibraci a plnou definici hypoplastického modelu pro jíly od Mašína (2013a) je zapotřebí minimálně jedna zkouška stlačitelnosti (např. oedometrická) na rekonstituovaném vzorku a jedna trojosá smyková zkouška. Určení většiny parametrů probíhá díky fitování simulací s experimentálními daty (Mašín, 2017b).

Parametry N a λ lze získat z experimentálních dat přímo, ale to pouze v případě, kdy je použitou zkouškou izotropní zatěžovací zkouška stlačitelnosti na rekonstituovaném vzorku. V případě izotropní zkoušky stlačitelnosti koresponduje směrnice zatěžovací větve s parametrem λ a průsečík s osou y souhlasí s parametrem N . V případě použití oedometrických zkoušek lze použít směrnici zatěžovací větve jako v případě izotropních zkoušek, jelikož směrnice izotropní NCL a K_0 NCL jsou rovnoběžné. Průsečík s osou y lze převzít v případě oedometrických zkoušek spíše jako odhad parametru N , který lze stanovit pomocí simulací z modelu a proložením s experimentálními daty v normalizované rovině $\ln(\sigma_a/p_r)$ vůči $\ln(1+e)$.

Parametr κ , který představuje směrnici odlehčovací větve zkoušky stlačitelnosti, nelze z experimentálních dat stanovit přímo, na rozdíl od parametru λ . Jeho kalibrace je možná pouze za pomoci simulací a prokládání s experimentálními daty v rovině $\ln(\sigma_a/\sigma_r)$ vůči $\ln(1+e)$ v případě oedometrických zkoušek a v rovině $\ln(p/p_r)$ vůči $\ln(1+e)$ v případě izotropních zkoušek odlehčování. Směrnice κ je nejlépe stanovena na bodech experimentálních dat v počátku odlehčování z NCL.

Tyto parametry lze stanovit i pro zkoušky na neporušeném vzorku, avšak parametr λ je lépe charakterizován na vzorku rekonstituovaném. Tento fakt je způsoben tím, že v případě rekonstituovaných vzorků je vzorek zbaven vlivu původního zatížení na zeminu v její geologické historii a tudíž linii vzniklou zatěžováním vzorku lze brát jako charakteristickou pro NCL.

Na rozdíl od parametrů N , λ a κ , které jsou kalibrovány ve smyslu zkoušek stlačitelnosti vzorku, parametry φ_c a v se kalibrují za použití experimentálních dat trojosých smykových zkoušek pevnosti. V případě kalibrace těchto dvou parametrů je jejich hodnota zjištěna pomocí fitování s experimentálními daty, kdy parametry pro charakterizující chování při stlačení jsou již určeny a budou se pouze ladit. V případě nedrénovaných triaxiálních zkoušek, kde se nemění objem vzorku a tedy změna objemového přetvoření je nulová pro celý průběh zkoušky, probíhá kalibrace kritického úhlu vnitřního tření φ_c v zobrazení q vůči p ,

kde φ_c určuje úhel obálky pevnosti, po které se po dostatečné době zatěžování může stav zeminy pohybovat. Snahou tedy je, aby φ_c bylo určeno takové, aby se křivky simulace a experimentu setkali v místě největšího deviátorového napětí q , kterého bylo během zkoušky dosaženo. V případě drénované trojosé zkoušky pevnosti je parametr φ_c kalibrován z pracovního diagramu (q vůči ε_s), kde je snahou, aby se křivky simulace a experimentů překrývaly v místě kritického stavu, který bývá v místě, kde nedochází ke změnám napětí se změnou přetvoření.

Parametr φ_c ovlivňuje tuhost hypoplastického modelu pro jíly. Tento parametr je kalibrován jak v případě nedrénovaných zkoušek, tak i drénovaných v pracovním diagramu stejným způsobem. Jeho kalibrace probíhá pomocí fitu simulací a experimentálních dat, kde je snahou, aby směrnice v počátcích pracovního diagramu nejlépe odpovídala experimentálním datům (Mašín, 2013a; Mašín, 2017b).

3.2 Kalibrace konstitučního modelu pro hrubozrnné zeminy

Pro kalibraci všech parametrů konstitučního hypoplastického modelu určeného pro charakterizaci mechanického chování hrubozrnných materiálů je zapotřebí mít minimálně jednu oedometrickou zkoušku na rozvolněném kyprém vzorku zeminy a naopak jednu drénovanou triaxiální smykovou zkoušku na vzorku hutném (s větší hustotou než vzorek pro oedometrickou zkoušku). Užitečnou zkouškou, ale ne nezbytnou, je zkouška sypného úhlu nebo úhlu přirozené sklonitosti, avšak to pouze pro zeminy, v nichž je dominantní složkou hrubozrnná frakce (Mašín, 2017b).

Pro většinu hrubozrnných zemin se pro charakterizaci parametru modelu φ_c , který představuje úhel vnitřního tření v kritickém stavu, používá zkouška sypného úhlu. Smysl této zkoušky je v charakterizaci kritického úhlu vnitřního tření na základě úhlu zjištěného během procesu vytváření kužele rozdušeného vzorku hrubozrnné zeminy. Tento kužel je nasypáván z trychtýře nejlépe z nulové výšky (trychtýř je během nasypávání kužele zeminy postupně plynule zvedán). Úhel sklonu kužele vůči podložce odpovídá úhlu vnitřního tření v kritickém stavu, není tedy zapotřebí tento úhel zjišťovat z trojosé smykové zkoušky (obr. 3.1), jako v případě konstitučního hypoplastického modelu určeného pro jíly, kde jiná možnost není. Druhou možností představuje odhad úhlu vnitřního tření v kritickém stavu podobně jako v případě hypoplastického modelu pro jíly.

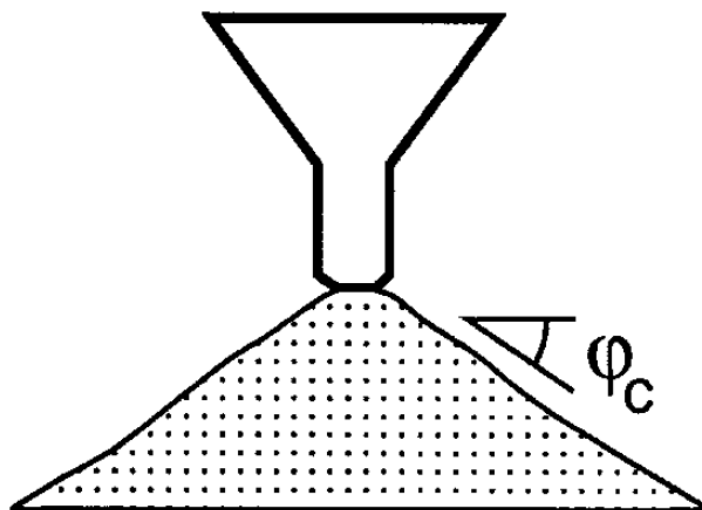
Parametry e_{i0} , e_{d0} a e_{c0} představují počáteční čísla pórovitostí pro limitující křivky čísel pórovitostí (obr. 2.4). Parametr modelu e_{c0} je většinou roven počátečnímu číslu pórovitosti oedometrické zkoušky na kyprém vzorku hrubozrnné zeminy, a to z toho důvodu, že oedometrická zkouška zhotovená na takto připraveném hrubozrnném vzorku zeminy odpovídá křivce e_c . Tato křivka v modelu představuje křivku kritického stavu a je jednou z limitujících křivek čísla pórovitosti. Parametry e_{i0} a e_{d0} , představující počáteční maximální a minimální čísla pórovitostí. Tyto parametry jsou určeny empirickými rovnicemi, které navrhli Herle a Gudehus (1999) pro e_{i0} :

$$(3.1) \quad e_{i0} = 1.2e_{c0}$$

a Mašín (2017b) pro e_{d0} :

$$(3.2) \quad e_{d0} = 0.5e_{c0}$$

Tento způsob určení parametrů maximálního a minimálního čísla pórovitostí je nejpohodlnější a nejpoužívanější. Navržená automatická kalibrační aplikace s tímto přístupem počítá, i proto byl tento přístup uvažován pro ruční kalibrace všech vzorků v databázi hrubozrnných vzorků.



Obr. 3.1: Zkouška sypného úhlu pro hrubozrnné zeminy (z Herle a Gudehus, 1999)

Parametr h_s představuje sklon limitujících křivek čísel pórovitostí a parametr n , představuje zakřivení limitujících křivek čísel pórovitostí. Tyto parametry se kalibrují pomocí experimentálních dat oedometrické zkoušky na kyprém vzorku hrubozrnné zeminy, jehož experimentální měření odpovídají limitující křivce kritického stavu e_c . Pokud je správnou volbou h_s a n křivka e_c charakterizována z oedometrických dat, tak není třeba tyto parametry kalibrovat pro stanovení křivek e_i a e_d . Tento fakt je vidět v rovnici (2.6). Pro stanovení těchto dvou parametrů se použije jejich fyzikálního významu, který je vyjádřen v rovnicích:

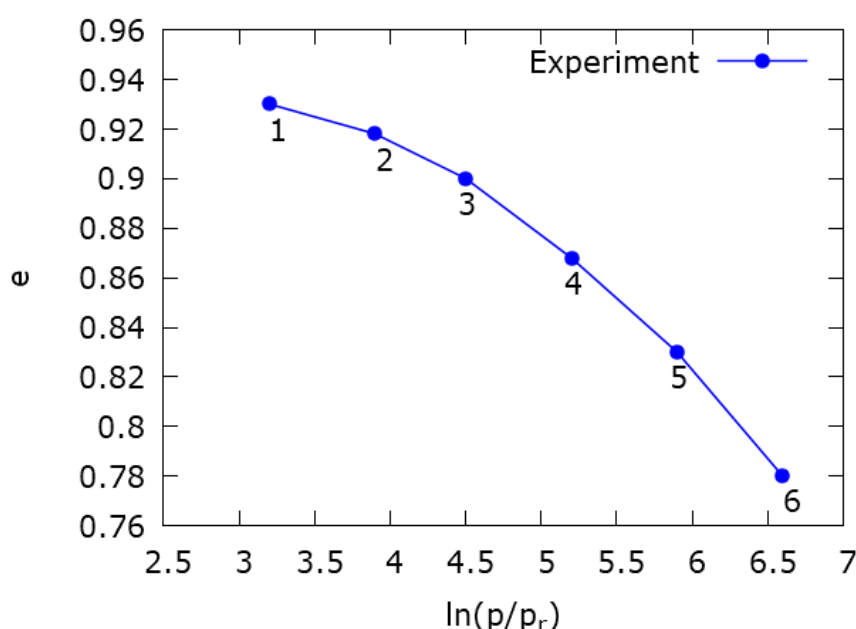
$$(3.3) \quad h_s = 3p \left(\frac{ne}{c_c} \right)^{1/n}$$

$$(3.4) \quad n = \frac{\ln\left(\frac{e_1 c_{c2}}{e_2 c_{c1}}\right)}{\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}$$

Kde p , p_1 a p_2 jsou střední napětí, e , e_1 a e_2 jsou čísla pórovitosti, C_c , C_{c1} a C_{c2} jsou směrnice NCL v zobrazení e vůči $\ln(p)$ a h_s a n jsou parametry modelu.

Hodnoty středního napětí p , čísla pórovitosti e a směrnice C_c bez indexů jsou hodnoty získané z bodů 3 a 4 z obr. 3.2. Hodnoty s indexem 1 jsou hodnoty získané díky bodům 1 a 2 z obr. 3.2 a hodnoty s indexem 2 jsou hodnoty získané díky bodům 5 a 6 z obr. 3.2. Střední napětí a čísla pórovitosti jsou pouhým průměrem uvedených dvou bodů. Směrnice C_c představuje průměrnou směrnici oedometrické zkoušky. Směrnice C_{c1} představuje nejpozvolnější směrnici oedometrické zkoušky a C_{c2} představuje nestrmější směrnici oedometrické zkoušky. Pro tyto dvě směrnice s indexem 1 a 2 musí platit, že $C_{c1} < C_{c2}$. Tyto směrnice poté ve výsledku charakterizují křivost křivky z oedometrické zkoušky a její sklon, která odpovídá limitující křivce kritického stavu e_c . Jelikož parametr h_s je počítán za pomoci parametru n , je možné, že výsledný sklon nebude odpovídat experimentálním datům oedometrické zkoušky, v takovém případě je možné parametr h_s ručně snížit nebo zvýšit pro přesnější fit oedometrické zkoušky.

Parametry α a β představují parametry, kterými lze charakterizovat chování při porušení. Pro jejich stanovení je zapotřebí triaxiální smyková zkouška, přičemž jejich kalibrace probíhá, na rozdíl od parametrů h_s a n , pomocí fitování simulací s experimentálními daty a zároveň se kalibrují jako nakonec a společně v zobrazení q vůči ε_s , přičemž parametrem α je fitován vrcholový stav zkoušky a parametr β ovlivňuje tuhost (Herle a Gudehus, 1999; Mašín, 2017b).



Obr. 3.2: Obrázek ukazující body oedometrické zkoušky, ze které se kalibrují parametry modelu h_s a n

4 SADA JEMNOZRNNÝCH ZEMIN

V počátku spolupráce na tématu této práce obsahovala databáze jemnozrnných zemin celkem 15 experimentálních sad, pocházející z různých lokalit České Republiky. Tato databáze byla vytvořena během prvních let projektu TAČR a byla sestavena institucemi, které v projektu figurovaly, především Arcadis (dnes SG Geotechnika) a Přírodovědeckou fakultou Univerzity Karlovy. Tato experimentální data měla posloužit pro účely testování kalibrační aplikace. Většina z těchto sad obsahuje běžně používané experimentální zkoušky na jemnozrnných vzorcích, mezi něž patří oedometrické zkoušky na rekonstituovaných i neporušených vzorcích, trojosé nedrénované zkoušky na rekonstituovaných a neporušených vzorcích. Pouze jedna experimentální sada obsahovala drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích. Každá z těchto sad zároveň obsahuje informace o Attebergových mezích, společně se zrnitostní křivkou a hodnotou S_G (specific gravity). V tabulce 4.1 jsou všechny tyto experimentální sady seskupeny a je zde specifikováno, jaké experimentální zkoušky jsou v sadách obsaženy společně s jejich počtem. Později byla sada jemnozrnných vzorků rozšířena o další experimentální sady (kap. 4.2).

Tabulka 4.1: Sada jemnozrnných vzorků

Lokality jemnozrnné	OED-NAT	OED-REC	CIUP-NAT	CIUP-REC	CID-REC	BENDER
Bílina 46609	1	1	3	3	-	-
Bílina 47076	1	1	3	3	-	-
Bílina 49172	1	1	3	3	-	-
Bílina 49703	1	1	3	3	-	-
Bílina 49714	1	1	3	3	-	-
Bošilec	1	1	-	3	-	-
Brno	1	-	3+1*	-	-	1
Hájek	1	1	3	3	-	-
Metro 5A 36778	1	1	3	3	-	-
Metro 5A 36779	1	-	3	3	-	-
Prackovice	2	2	-	3	-	-
Přeštice	1	1	-	3	-	-
Senec	1	1	-	3	-	-
Újezd pod Troskami	-	2	-	-	6	-
Zaječí	1	1	-	3	-	-

*zkouška obsahuje měření tuhosti v oboru malých přetvoření

4.1 Kalibrace sady jemnozrnných zemin

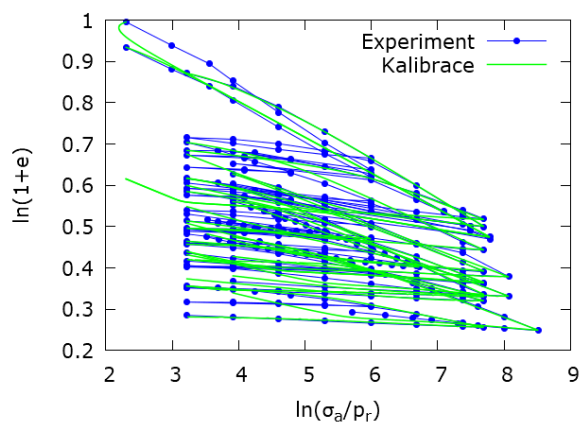
V rámci prvního vstupu pro posouzení funkčnosti kalibrační aplikace bylo třeba provést ruční kalibrace, tak jak by dané sady měly být nakalibrovány pro účely zhotovení modelu. V rámci ručních kalibrací bylo celkem z databáze jemnozrnných zemin nakalibrováno 14 experimentálních sad (všechny výše zmíněné kromě sady Brno, ta byla kalibrována v Mašinovi (2013a) pro účely hodnocení konstitučního modelu) a dodatečně byly v rámci

druhé fáze testování kalibrační aplikace dokalibrovány ještě sady Hongkong a Weald z dodatečného rozšíření databáze jemnozrnných zemin (kap. 4.2).

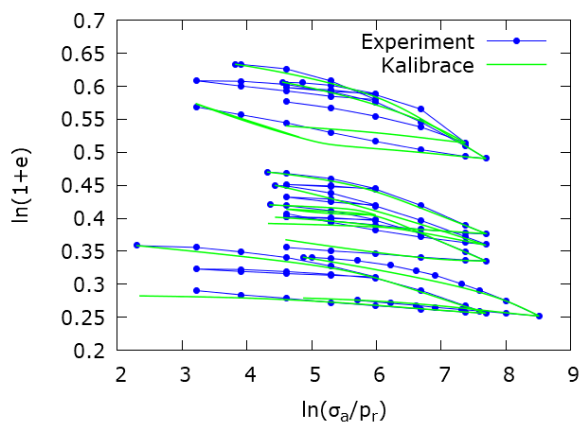
Postup kalibrace konstitučního modelu pro jemnozrnné zeminy, používaného v této práci, je popsán v kap. 3.1. V rámci kalibrování jemnozrnných sad bylo vždy postupováno stejným postupem: prvně byla kalibrována oedometrická zkouška nebo izotropní zatěžovací zkouška na rekonstituovaném vzorku (když tato zkouška chyběla, byla použita zkouška stlačitelnosti na vzorku neporušeném – např. pro sadu Metro 5A 36779), kde byl nakalibrován odhad parametrů ovlivňujících chování při stlačení, tyto parametry byly následně využity pro kalibrování parametrů simulující trojosé zkoušky. Tyto trojosé zkoušky byly většinou nedrénované, nicméně je možné použít i drénované na rekonstituovaných vzorcích. Po zjištění všech parametrů způsobem uvedeným výše byly opakovaným postupem parametry zpřesňovány dalšími dvěma až několika iteracemi (hlavně u rozsáhlých nebo problémových sad – např. Újezd pod Troskami byla kalibrována desítkami iterací). Nakonec byla kalibrována a charakterizována oedometrická zkouška na neporušeném vzorku (pokud byla k dispozici a pokud její charakteristika byla možná), pro kterou byly použity původně nakalibrované parametry, kromě parametrů N a κ , které byly upraveny pro konkrétní zkoušku. Pro každou nakalibrovanou sadu byly sestaveny parametry konstitučního modelu, charakterizující chování daného vzorku, a grafy, které tuto charakteristiku potvrzují.

Většina jemnozrnných sad byla v rámci kalibrování bezproblémových. Dobrý výsledek se dostavil již u druhé až třetí iterace kalibrování. Nejproblémovější byly sady obsahující drénované trojosé zkoušky, k jejichž charakterizaci pomocí konstitučního modelu bylo vynaloženo větší úsilí. Sady obsahující drénované trojosé zkoušky z databáze jemnozrnných sad se ukázaly později problémové i pro kalibrační aplikaci, což byl jeden z důvodů dokalibrovávání sad Hongkong a Weald, které tyto zkoušky obsahují. U sady Újezd pod Troskami byl největší problém v charakterizování tuhosti v rovině deviátorového napětí vůči axiálnímu přetvoření (q vs. ε_a), kde se nezbytně parametr ν , charakterizující tuhost, blížil k hranici 0,5. Poissonovo číslo nemůže dle své definice být větší než 0,5, proto byl tento parametr u této sady nakonec určen na 0,35 a výsledky ruční kalibrace jsou díky tomu realistické, i když ne zcela přesné.

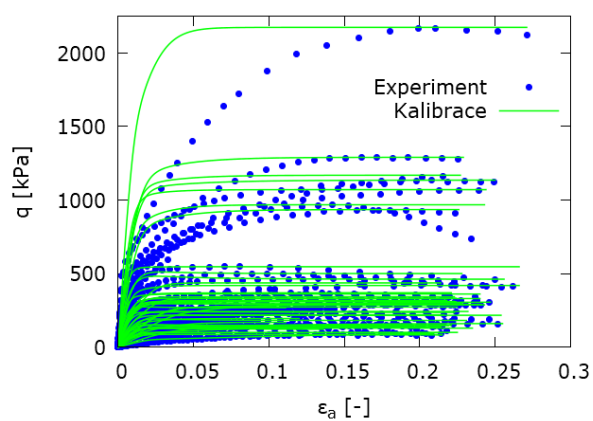
Kalibrace všech sad jsou poté vyobrazeny v obr. 4.1a-f. Je nutné dodat, že obr. 4.1 má spíše ilustrační charakter a dává představu o množství kalibrovaných experimentů v rámci databáze jemnozrnných zemin. Celkově bylo ručně kalibrováno 16 oedometrických zkoušek na rekonstituovaném vzorku, 7 oedometrických zkoušek na neporušeném vzorku, 46 nedrénovaných triaxiálních zkoušek na rekonstituovaných vzorcích a 11 drénovaných triaxiálních zkoušek na rekonstituovaných vzorcích.



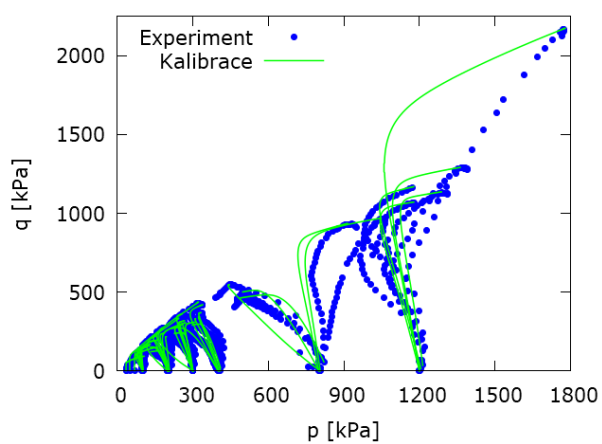
a)



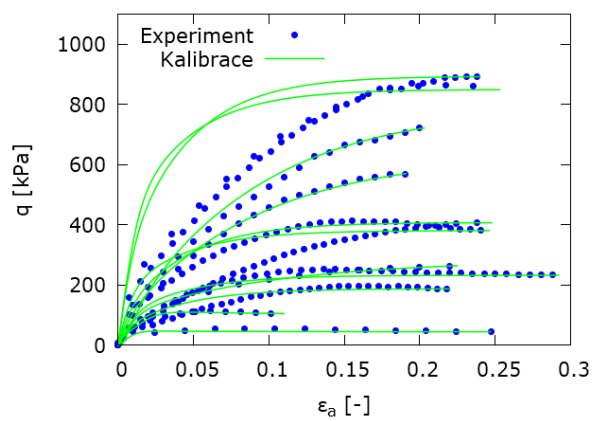
b)



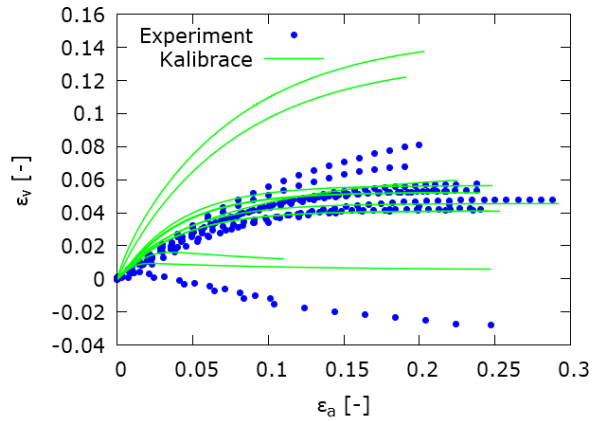
c)



d)



e)



f)

Obr. 4.1: Grafy nakalibrovaných jemnozrnných sad, a) oedometrické zkoušky na rek. vzorku, b) oedometrické zkoušky na nep. vzorku, c) a d) nedrénované trojosé zkoušky na rek. vzorcích, e) a f) drénované trojosé zkoušky na rek. vzorcích

V tabulce 4.2 jsou shrnuty parametry konstitučního modelu pro jemnozrné zeminy pro všechny kalibrované sady jemnozrných zemin v rámci této práce.

Tabulka 4.2: Parametry ruční kalibrace modelu pro jemnozrné vzorky

Lokalita jemnozrné	Parametry modelu				
	φ_c	λ	κ	N	ν
Bílina 46609	26,0	0,0440	0,0140	0,7000	0,25
Bílina 47076	23,5	0,0612	0,0130	0,9880	0,20
Bílina 49172	30,8	0,0321	0,0060	0,5000	0,30
Bílina 49703	25,5	0,0734	0,0190	1,0050	0,19
Bílina 49714	24,0	0,0636	0,0230	0,8800	0,17
Bošilec	33,9	0,0423	0,0015	0,6400	0,44
Hájek	36,0	0,0385	0,0075	0,6200	0,16
Hongkong	31,0	0,1081	0,0140	1,2092	0,05
Metro 5A 36778	33,5	0,0606	0,0220	0,7590	0,10
Metro 5A 36779	35,6	0,0550	0,0110	0,7130	0,20
Prackovice	28,6	0,0868	0,0240	1,1435	0,30
Přestice	30,7	0,0619	0,0160	0,8350	0,15
Senec	27,3	0,0738	0,0200	0,8990	0,13
Újezd pod Troskami	31,1	0,0604	0,0040	0,8590	0,35
Weald	24,1	0,0595	0,0310	0,8000	0,10
Zaječí	28,0	0,0984	0,0400	1,2510	0,01

4.2 Rozšíření databáze jemnozrných zemin

I přestože byla databáze jemnozrných vzorků poměrně rozsáhlá a obsahuje různé vzorky z míst České Republiky, byla dosavadní databáze, kterou sestavily instituce figurující v projektu TAČR, jednotvárná. Pro vylepšení pestrosti databáze jemnozrných vzorku ji bylo třeba rozšířit o různorodé sady zahraničních vzorků, používaných v člancích pro účely testování různých konstitučních modelů. Tyto rozšiřující sady jemnozrných vzorků obsahují například měkké jíly, senzitivní jíly, nebo sady s širokou paletou experimentálních zkoušek např. zkoušky izotropního stlačení či drénované triaxiální zkoušky, které nejsou příliš obvyklé na jemnozrných vzorcích, avšak používají se a kalibrační aplikace by si i s jejich kalibrací měla poradit.

Rozšíření databáze jemnozrných sad tedy bylo účelné nejen po samotné ruční kalibrování, ale především mělo později posloužit k samotnému testování kalibrační aplikace. I když se zdá, že tento úkol byl pouze o vyhledání sady a její digitalizaci, tak to tak bohužel není. Do kalibrační aplikace je třeba data vložit ve správném formátu, kterým je excelovský soubor, jež musí obsahovat listy se správným jménem a na listech, kde zpravidla jsou data pro experimenty trojosých zkoušek (ať už drénovaných, či nedrénovaných) jsou 3 nebo 4

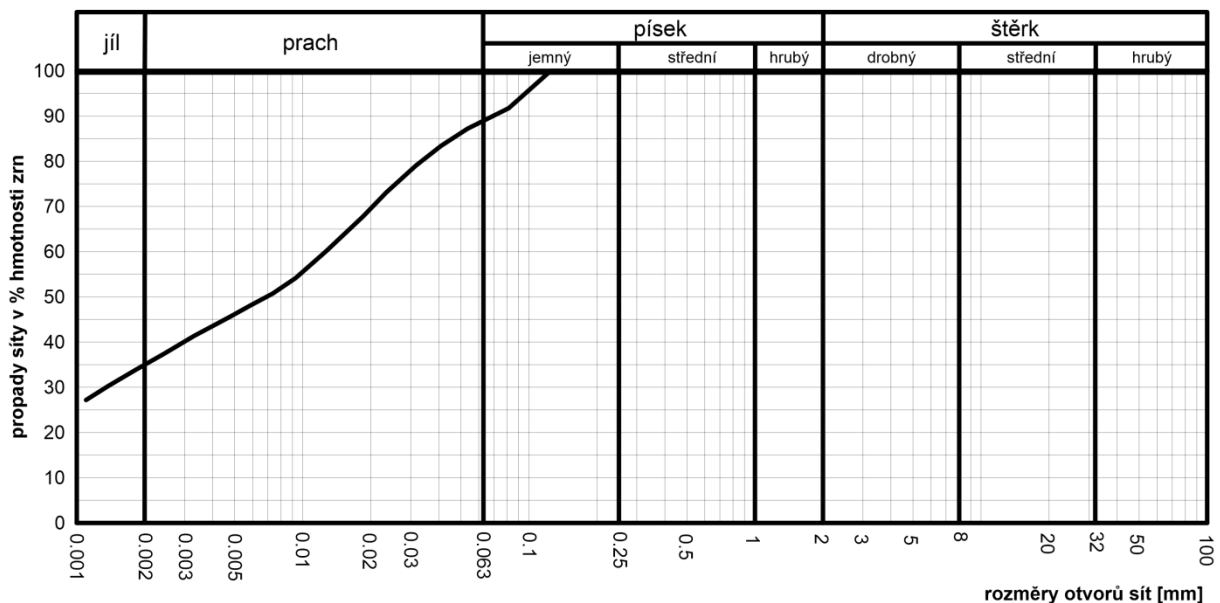
sloupce dat, v následující sekci bude popsán formát listu s daty nedrénované triaxiální zkoušky.

Formát listu, kde je definovaná nedrénovaná triaxiální zkouška, který vkládáme do kalibrační aplikace, obsahuje 3 sloupce dat, a to: ϵ_a , q a p (deformace ve vertikálním směru, deviátorové napětí a střední napětí). Jak je vidět, tak pro vektor deviátorového a středního napětí máme pouze jeden vektor axiálního přetvoření, v jiném případě by kalibrační aplikace nebyla schopna data zpracovat. Nicméně při digitalizaci sady experimentálních dat z článků získáme 4 sloupce dat. Tento fakt je způsoben tím, že tato konkrétní zkouška je představována dvojicí závislostí, a to axiální přetvoření na deviátorovém napětí a deviátorového napětí na středním napětí. Díky dvojici těchto závislostí získáme dva vektory dat z jedné závislosti a další dva vektory dat ze závislosti druhé. Pro tyto 4 vektory dat představují dva z vektorů stejnou veličinu, a to deviátorové napětí. Z tohoto důvodu musí dojít k redukci sloupců dat ze 4 na 3 sloupce právě přes tuto veličinu. Tento proces přepočítání a redukce 4 vektorů dat na 3 vektory, neboli na formát, který vyžaduje kalibrační aplikace, probíhal následovně: nejprve byl zvolen vhodný vektor společné veličiny (v tomto případě deviátorové napětí), díky kterému poté došlo k lineární interpolaci přes digitalizovaná data. Tímto způsobem jsou získány další dva sloupce dat, přesně tak, jako bychom data pro daný vzorek dostali z laboratoře. Takto získaná data jsou již ve správném formátu pro kalibrační aplikaci. Podobný postup byl prováděn i v rámci úprav drénovaných trojosých zkoušek, získaných z článků, avšak společnou veličinou bylo tentokrát axiální přetvoření.

Způsobem, který je popsán výše, bylo zpracováno a do databáze jemnozrnných vzorků dodáno celkem 8 zahraničních sad. V následující sekci budou tyto sady popsány.

První sadou, která v databázi figuruje abecedně první, je sada experimentálních zkoušek pro tzv. Bangkok Soft Clay, resp. měkký bangkokský jíl. Tento jíl, jak již název sady napovídá, se nachází v podloží Bangkoku v Thajsku. Jedná se o měkký jíl, na kterém byly prováděny laboratorní experimenty hlavně na neporušených vzorcích, které mají počáteční číslo pórovitosti až 3,4. Podle Seah a Lai (2003) a Surarak et al. (2012) má měkký bangkokský jíl 64,3 % jílových, 31,7 % prachových a 4 % pískových částic, jeho Atterbergovy meze bývají obvykle 43,1 % pro mez plasticity a 118,5 % pro mez tekutosti. Na základě uvedených článků byla sestavena sada experimentálních dat obsahující tři oedometrické zkoušky, pět trojosých drénovaných zkoušek a pět nedrénovaných trojosých zkoušek, všechny na neporušených vzorcích.

Další sadou přidanou do databáze jemnozrnných vzorků byla sada tzv. Boston Blue Clay (Chakraborty et al., 2013; Ladd a Varallyay, 1965). Tato experimentální sada obsahuje tři trojosé nedrénované zkoušky na rekonstituovaných vzorcích a jednu oedometrickou zkoušku také na rekonstituovaném vzorku. V zásadě není tato sada nijak výjimečná, avšak experimentální data trojosých zkoušek byla převzata z práce Laddeho a Varallyaye (1965) přímo, nemusela být digitalizována. Tato experimentální sada zároveň obsahuje přesnou zrnitostní analýzu, která je ukázána na obr. 4.2, Attebergovy meze pro bostonský jíl jsou 20 % pro mez plasticity a 41 % pro mez tekutosti.



Obr. 4.2: Zrnitostní křivka sady Boston Blue Clay

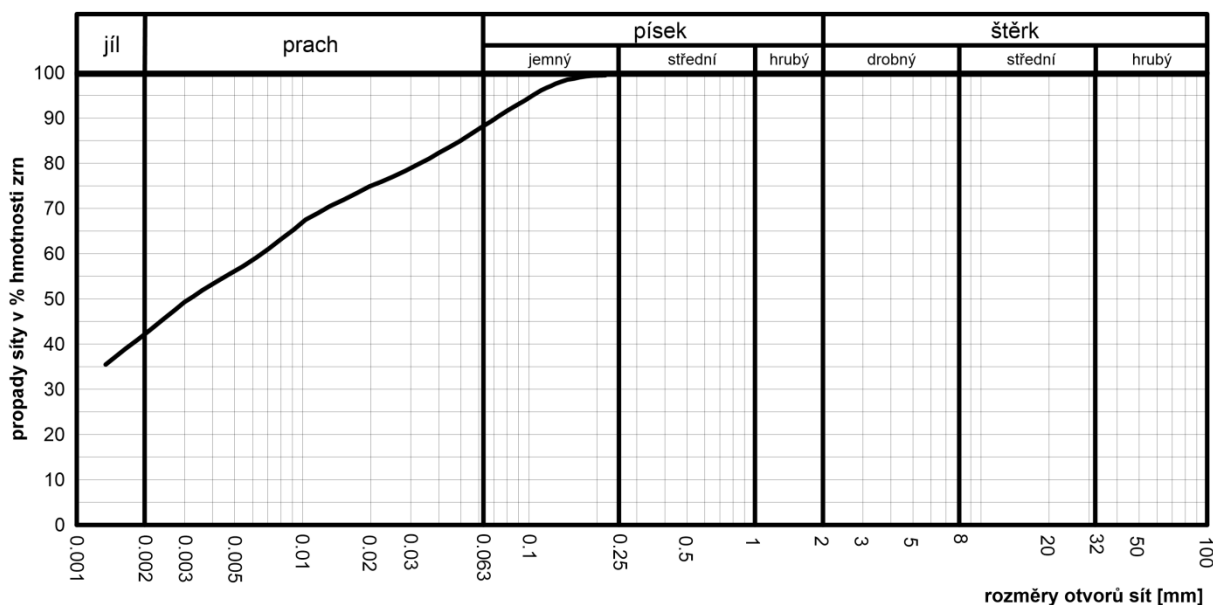
Další sadou poskytnutou pro účely testování je sada dortmundského jílu. Tato sada obsahuje pouze tři nedrénované trojosé zkoušky na neporušených vzorcích a byla použita pro testování hypoplastického modelu pro jemnozrnné zeminy (Mašín, 2013a), experimentální data publikoval Herle et al. (2011).

Dalšími dvěma sadami přidanými do databáze byly finské senzitivní jíly, a to konkrétně tzv. Espoo Otaniemi a Espoo Vanttila. Tato experimentální data byla publikována v Koskinen (2014) a Karstunen a Koskinen (2008). Tyto senzitivní měkké jíly neobsahují žádnou písčnou frakci, liší se obsahem jílových částic, kde jíl Otaniemi obsahuje 78 % jílové a 22 % prachové frakce a jíl Vanttila obsahuje 51 % jílových a 49 % prachových částic, jejich Attebergovy meze jsou velmi podobné, a to $w_L = 95 \%$, $w_p = 29 \%$ pro jíl Otaniemi a $w_L = 98 \%$, $w_p = 30 \%$ pro jíl Vanttila. Sada jílu Otaniemi obsahuje čtyři zkoušky izotropního zatěžování na rekonstituovaných vzorcích a tři trojosé nedrénované zkoušky na vzorcích neporušených, zatímco sada pro Vanttilský jíl obsahuje pouze dvě zkoušky izotropního zatěžování na rekonstituovaných vzorcích, avšak pět trojosých nedrénovaných zkoušek na vzorcích neporušených.

Další v řadě přidaných sad experimentálních dat nese název Hongkongského marinního jílu, který se vyskytuje v podloží přístavu Tai Kowk Tsui a je prezentována v Yang et al. (2016) a v Yin a Zhu (1999). Ti ve svých pracích popisují vlastnosti daného vzorku a jmenují některé z jeho vlastností, které budou dále vyjmenovány. Hongkongský marinní jíl obsahuje z větší části jemnozrnnou frakci rozdělenou 27,5 % jílu a 46,5 % prachu, dále je jeho obvyklou součástí částice jemné písčové frakce (do 0,15 mm) a to v obsahu 26 %. Mez plasticity se pohybuje okolo 28 % a mez tekutosti je obvykle 60 %. Poměrně komplexní experimentální sada obsahuje pouze zkoušky prováděné na rekonstituovaných vzorcích. Experimentální sada Hongkongského jílu obsahuje jednu izotropní zatěžovací zkoušku, čtyři

trojosé testy za nedrénovaných podmínek a dvě trojosé zkoušky za podmínek drénovaných. Tato experimentální sada byla v rámci druhé fáze testování kalibrační aplikace ručně dokalibrována a porovnána s výsledky kalibrační aplikace (více v kap. 6).

V řadě předposlední přidanou sadou experimentálních dat, která byla přidána do databáze jemnozrnných vzorků pro účely testování kalibrační aplikace, byla experimentální sada nesoucí název Koper soft silty clay, neboli měkký prachovitý jíl Koper. Jedná se o marinní jíl z přístavu v Koper ve Slovinsku. Tato experimentální sada je převzata z Mašín et al. (2011), kde jsou jmenovány indexové veličiny daného vzorku a je zde vyobrazena zrnitostní křivka (obr. 4.3). Jíl Koper obsahuje 43 % jílové frakce, 45 % prachové frakce a 12 % částic jemnozrnného písku, jeho plasticitní meze jsou 64 % pro mez tekutosti a 34 % pro mez plasticity. Sada obsahuje celkem 9 laboratorních experimentů, mezi něž patří 3 oedometrické zkoušky na neporušených vzorcích, 3 oedometrické zkoušky na rekonstituovaných vzorcích a 3 trojosé nedrénované zkoušky na neporušených vzorcích.



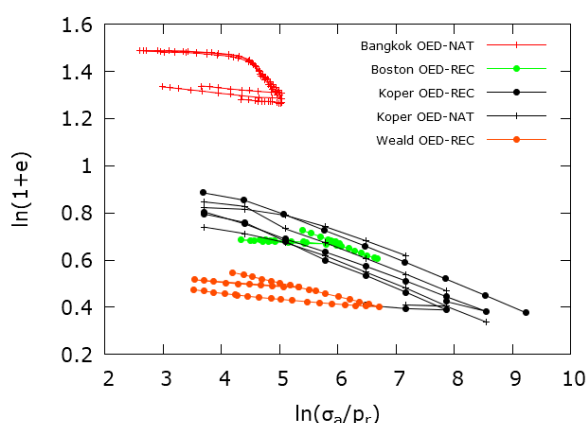
Obr. 4.3: Zrnitostní křivka měkkého prachovitého jílu Koper

Poslední sadou experimentálních dat je anglický jíl nesoucí pojmenování Weald clay, v přirozeném stavu se jedná o silně překonsolidovaný jíl, obsahující 40 % jílových a 60 % prachových částic. Mez tekutosti Weald jílu je okolo 43 % a mez plasticity přibližně 18 %. Experimentální sada obsahuje laboratorní zkoušky pouze na rekonstituovaných vzorcích, čítajících celkem 7 experimentů. V sadě jílu Weald je jedna oedometrická zkouška, tři zkoušky trojosé za nedrénovaných podmínek a tři zkoušky trojosé za drénovaných podmínek, tato experimentální sada byla představena Henkelem (1956) a Parrym (1960). I tato sada, podobně jako sada Hongkongského jílu, byla později pro účely druhé fáze testování kalibrační aplikace ručně dokalibrována.

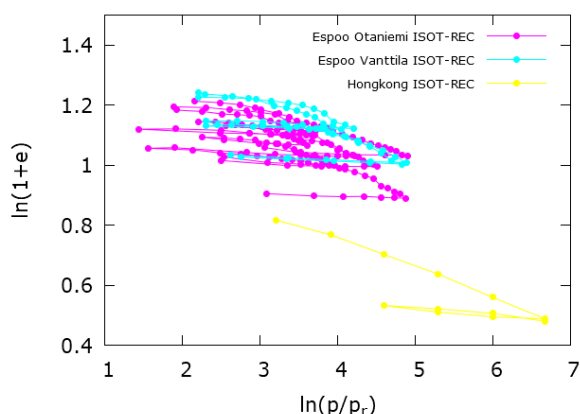
V této sekci byly vyčerpávající formou představeny experimentální sady, rozšiřují databázi jemnozrnných vzorků pro účely testování kalibrační kalibrace, pro lepší přehlednost kapitoly jsou indexové veličiny jednotlivých sad seskupeny v tabulce 4.3, digitalizovaná experimentální data všech přidanych sad jsou k vidění v obr. 4.4a-f.

Tabulka 4.3: Indexové veličiny daných experimentálních sad

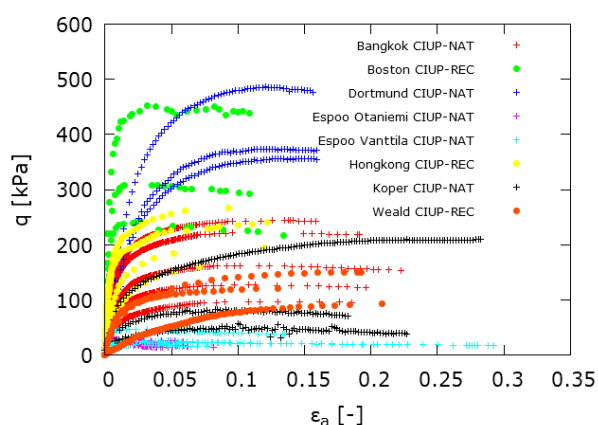
Lokality jemnozrné	S_G [-]	w_L [%]	w_p [%]	jíl [%]	prach [%]	písek [%]
Bangkok	2,75	118,5	43,1	64,3	31,7	4,0
Boston	2,78	41,0	20,0	34,9	53,9	11,3
Dortmund	-	-	-	-	-	-
Espoo Otaniemi	2,80	95,0	29,0	78,0	22,0	0,0
Espoo Vanttila	2,74	98,0	30,0	51,0	49,0	0,0
Hongkong	2,66	60,0	28,0	27,5	46,5	26,0
Koper	2,731	64,0	34,0	43,0	45,0	12,0
Weald	-	43,0	18,0	40,0	60,0	0,0



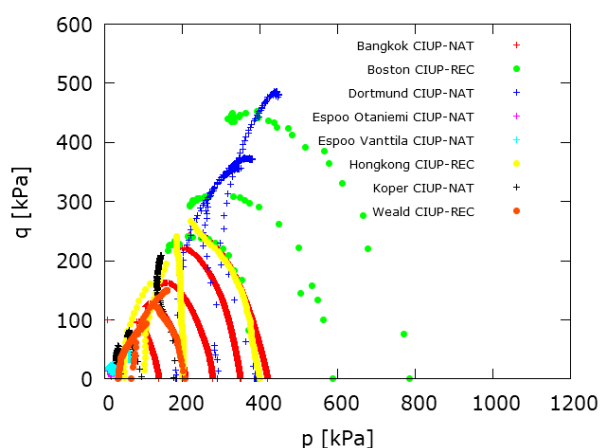
a)



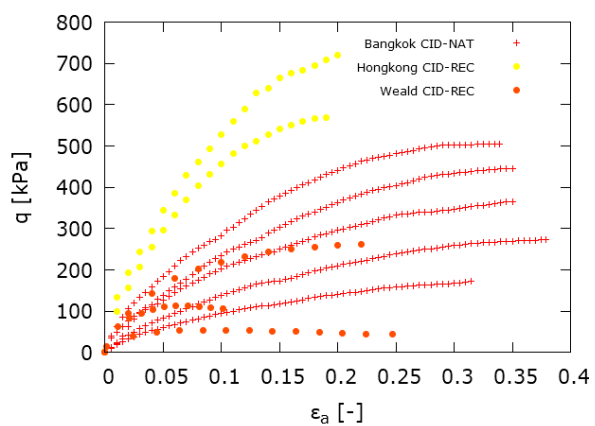
b)



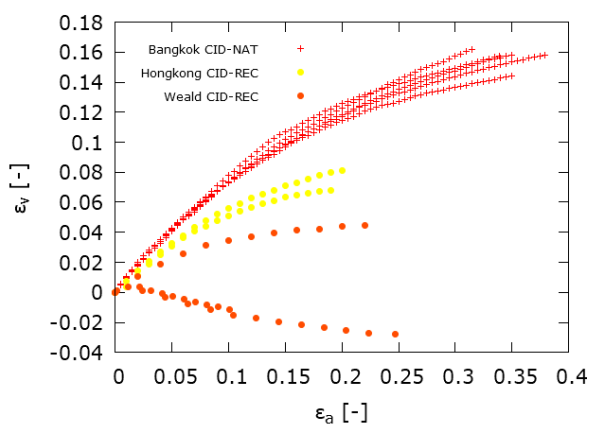
c)



d)



e)



f)

Obr. 4.4: Grafy digitalizovaných experimentálních sad, a) oedometrické zkoušky, b) zkoušky izotropního stlačení, c) a d) nedrénované trojosé zkoušky, e) a f) drénované trojosé zkoušky

5 SADA HRUBOZRNNÝCH ZEMIN

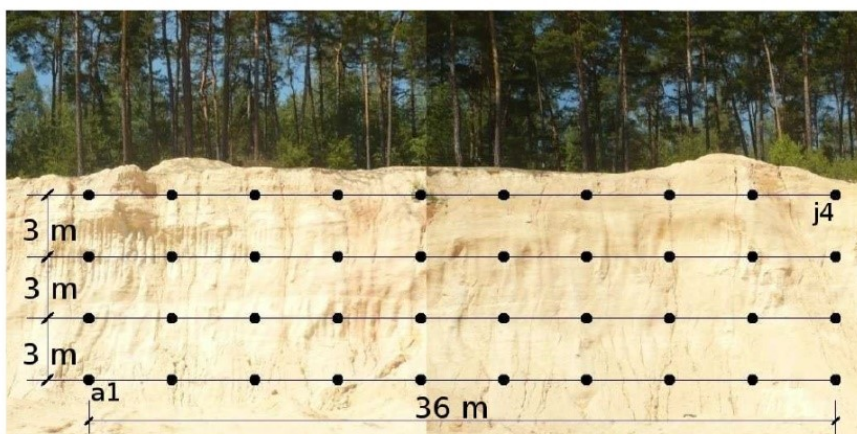
Podobně jako sada jemnozrnných zemin, tak i databáze hrubozrnných vzorků se sestává z několika charakteristicky sestavených sad experimentálních dat. Celkově bylo pro účely testování kalibrační aplikace k dispozici pouze 10 experimentálních sad z různých lokalit České Republiky. Databáze hrubozrnných vzorků vznikla podobně jako prvotní databáze jemnozrnných sad, a to sestavením této databáze institucemi figurujícími v projektu TAČR. Nakonec se počet 10 experimentálních sad v databázi zdál dostačující pro testování automatické kalibrace pro hrubozrnné vzorky. Experimentální sady bývají sestaveny z oedometrických a trojosých drénovaných zkoušek pouze na rekonstituovaných vzorcích (resp. rozvolněných). Tyto sady navíc obsahují informace o tzv. úhlu přirozené sklonitosti nebo sypném úhlu, který je pro účely kalibrace konstitučního modelu pro hrubozrnné materiály podstatný, a zároveň jsou v sadách data zrnitostních křivek. Pro přehlednost jsou jednotlivé počty a typy experimentálních zkoušek seskupeny v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1: Sada hrubozrnných vzorků

Lokality hrubozrnné	Sypný úhel	OED-REC	CID-REC	BENDER
Dobřany	1	1	3	-
Hrušovany	1	1	3	-
Chýně	1	2	3	-
Jablonec	1	1	3	-
Kolný	1	1	1	-
Komořany	1	4	4*	1
Kralupy	1	2	3	-
Motol	1	2	3	-
Rohatec	1	2	3	-
Štvanice	1	1	3	-

*zkouška obsahuje měření tuhosti v oboru malých přetvoření

V tab. 5.1 je uvedeno, že sada Kolný obsahuje po jedné zkoušce od každé (kromě zkoušky s bender elementy), což může působit jako chudá sada. Ve skutečnosti je sada Kolný sestavena z celkem 34 takto sestavených sad experimentálních zkoušek, vzniklá odebráním vzorků z písčitého profilu v pískovně Kolný v určité síti (obr. 5.1), tato sada posloužila pro výzkum prostorových a pravděpodobnostních změn v mechanickém chování materiálu (více v Suchomel a Mašín, 2011).



Obr. 5.1: Pohled na písečnou stěnu v pískovně Kolný (ze Suchomel a Mašín, 2011)

5.1 Kalibrace sady hrubozrnných zemin

Podobně jako u databáze jemnozrnných vzorků, tak i u databáze hrubozrnných vzorků byly prvním vstupem pro zhodnocení funkčnosti kalibrační aplikace ruční kalibrace jednotlivých experimentálních sad. Jednotlivé ruční kalibrace dávaly představu o tom, jaké výsledky mají být z kalibrační aplikace očekávány a zároveň byla data z ruční kalibrace porovnávána se simulacemi nakalibrovanými pomocí kalibrační aplikace.

V rámci ručního kalibrování byl používán konstituční model pro hrubozrnné materiály, který je popsán v kapitole 2.2. Konstituční model pro hrubozrnné materiály vyžaduje pro charakterizaci chování zeminy nakalibrování celkem 8 parametrů. Kalibrace modelu je popsána v kap. 3.2. Jako konstanta vstoupí do kalibrace výsledek ze zkoušky sypného úhlu, který dobře charakterizuje úhel vnitřního tření v kritickém stavu φ_c pro sypké hrubozrnné materiály, a který je parametrem modelu, podobně jako u konstitučního modelu pro jemnozrnné zeminy. Dále jsou do modelu dodány 3 čísla pórovitosti, která charakterizují počáteční maximální e_{i0} , minimální číslo pórovitosti e_{d0} a počáteční číslo pórovitosti v kritickém stavu e_{c0} pro limitující křivky modelu. Tato čísla pórovitosti jsou při kalibraci v podstatě neměnná, nicméně i jejich změnou se dá chování zeminy ovlivnit, tudíž nevystupují při kalibraci jako konstanty. Dále jsou pomocí svých rovnic a na základě dat oedometrické zkoušky na rekonstituovaném vzorku spočítány parametry ovlivňující chování při stlačení h_s a n . Parametry charakterizující limitující křivky čísel pórovitosti vstupují do kalibrace drénovaných trojosých zkoušek na rekonstituovaném vzorku, kde se ladí parametry ovlivňující chování při porušení α a β . Zmíněný parametr úhlu vnitřního tření v kritickém stavu φ_c je parametrem ovlivňující chování při porušení také, i když je do modelu vložen jako konstanta, tak jeho úprava je možná. Úprava úhlu vnitřního tření v kritickém stavu je možná při nekonzistenci zkoušky sypného úhlu s naměřenými daty drénovaných trojosých zkoušek v místě kritického stavu. Podobně jako u kalibrace konstitučního modelu pro jemnozrnné zeminy, tak i parametry modelu pro hrubozrnné materiály jsou zpřesňovány několika

iteracemi – úpravami parametru ovlivňující chování při stlačení na základě parametrů ovlivňující chování při porušení a naopak.

V rámci ručních kalibrací databáze hrubozrnných vzorků bylo celkem nakalibrováno deset sad, které jsou i se svými parametry uvedeny v tabulce 5.2.

Kalibrace konstitučního modelu pro hrubozrnné materiály byla náročnější než kalibrace konstitučního modelu pro materiály jemnozrnné, která se zdá autorovy této práce mnohem přirozenější. Přirozenost konstitučního modelu pro jemnozrnné zeminy je podpořena tím, že konstituční model pro jemnozrnné zeminy definuje chování při stlačení svými směrnici a průsečíkem, který ovlivňuje polohu našeho modelu v rovině $\ln(e+1)$ vůči $\ln(\sigma_a/p_r)$. Konstituční model pro hrubozrnné materiály definuje chování při stlačení pouze dvěma parametry, které ovlivňují tvar (míru křivosti čáry stlačení) a sklon zkoušky. Parametry definující chování při stlačení nejsou navíc laděny přímo na zkoušce pomocí srovnání s modelem. Tyto jsou počítány pomocí rovnic a experimentálních dat ze zkoušky stlačení, zároveň ovlivňují jeden druhý, proto jejich kalibrace je náročnější. Nakonec konstituční model pro hrubozrnné zeminy charakterizuje dané chování zeminy velmi dobře. Fakt, že tento model je náročnější na kalibraci více než předchozí model pro jemnozrnné zeminy, je podpořen tím, že první verze kalibrační aplikace, napsaná v prostředí interpretačního jazyka Matlab, kalibrovala jednoduché sady přibližně 3 hodiny a náročné až 10 hodin.

Tabulka 5.2: Parametry ruční kalibrace modelu pro hrubozrnné vzorky

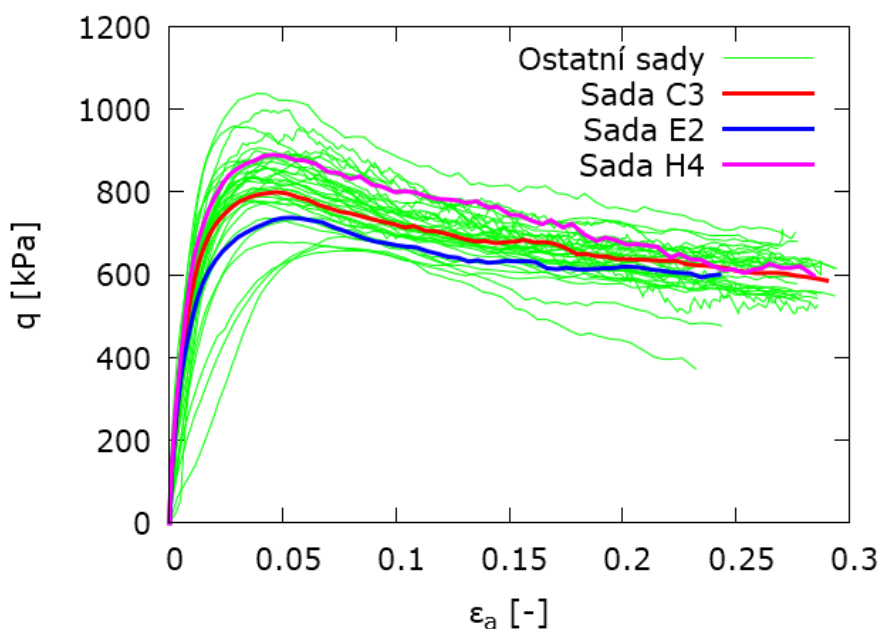
Lokality hrubozrnné	Parametry modelu							
	φ_c	h_s	n	e_{c0}	e_{d0}	e_{i0}	α	β
Dobřany	35,5	406519,5	0,18455	0,99610	0,49805	1,19531	0,17	4,1
Hrušovany	35,2	123096,6	0,11465	0,78510	0,39256	0,94214	0,28	3,9
Jablonec	36,8	3333,4	0,20200	0,94110	0,47050	1,12920	0,20	4,2
Kolný C3	36,0	81433,8	0,19790	0,86900	0,43450	1,04280	0,03	2,0
Kolný E2	35,3	47966	0,27530	0,85920	0,42960	1,03100	0,04	1,9
Kolný H4	33,7	17556,8	0,26280	0,78000	0,29500	0,93600	0,29	3,9
Komořany	35,1	17492,3	0,15135	0,91900	0,45950	1,10280	0,50	5,0
Kralupy	35,0	35248,6	0,21760	1,01720	0,50860	1,22060	0,50	5,0
Rohatec	35,0	2955732,7	0,21310	0,74140	0,37071	0,88970	0,11	2,7
Štvanice	36,7	9089,3	0,21524	1,08080	0,54041	1,29698	0,43	4,5

V rámci kalibrování byla většina sad, s přihlédnutím k výše zmíněnému, v zásadě bezproblémových. Nejnáročnější sadou na ruční kalibraci byla sada experimentálních dat Komořany, která obsahuje 4 zkoušky oedometrické a 4 drénované trojosé zkoušky. Největší problém v této sadě bylo v charakterizování oedometrických zkoušek. Při kalibraci oedometrických zkoušek je totiž potřeba celou sadu charakterizovat pouze jednou sadou parametrů, tak jak je uvedeno v tab. 5.2. Problém tedy nastává, když sada obsahuje více oedometrických zkoušek s různými počátečními čísly pórovitosti. Pokud bychom chtěli

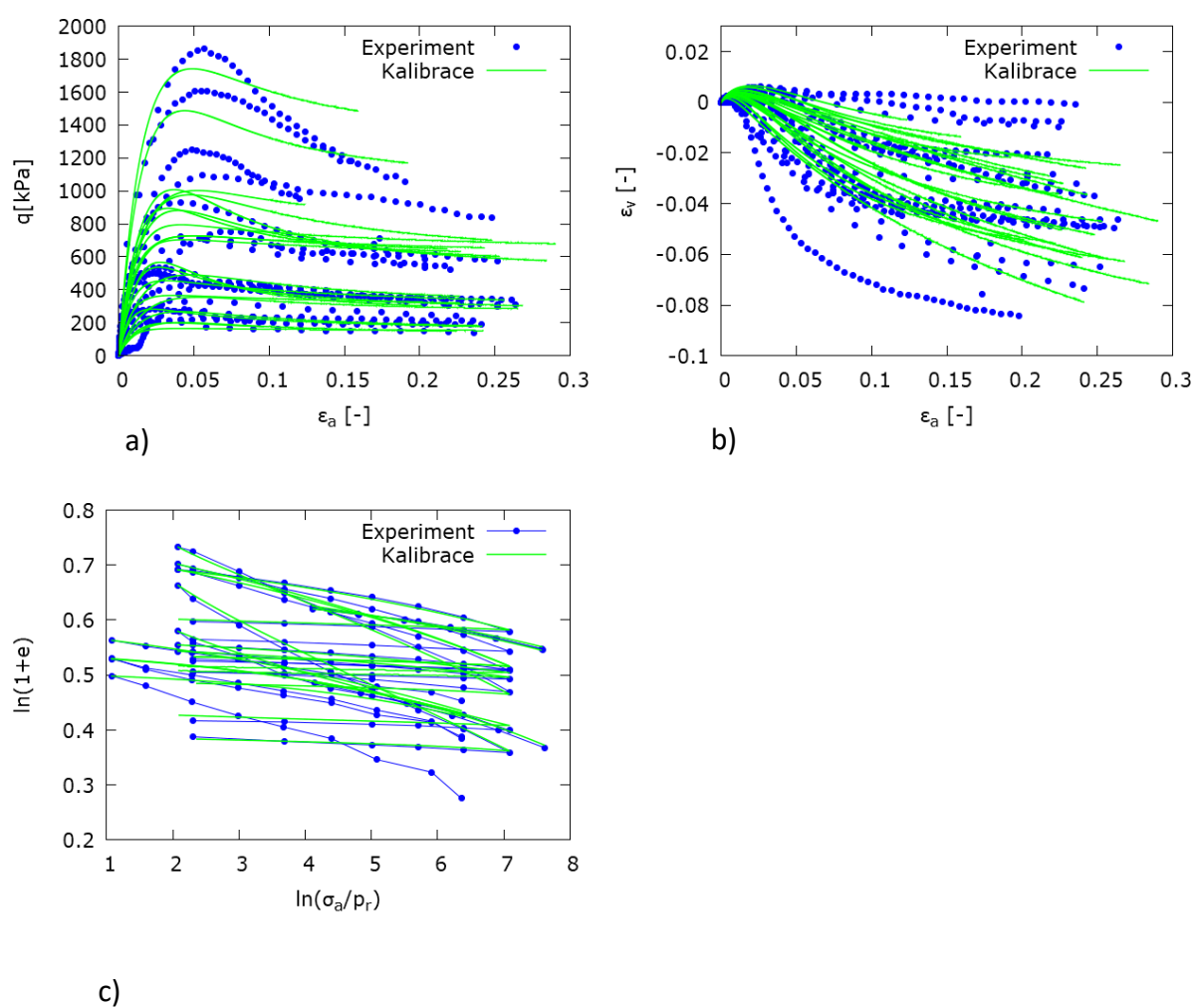
všechny tyto oedometrické zkoušky charakterizovat přesněji, museli bychom jim měnit parametr h_s , který ovlivňuje sklon křivky stlačení. Pro charakterizaci všech zkoušek jednou hodnotou h_s je volena taková, aby byly charakterizovány obě zkoušky, resp. průměrný sklon. V případě sady Komořany nemohl být tento postup volen, jelikož při zadání průměrné hodnoty h_s , která by měla charakterizovat všechny oedometrické zkoušky správně, docházelo k nerealistickému chování při porušení. Z tohoto důvodu byl jako vedoucí oedometr zvolen druhý ze sady, který měl nejvyšší počáteční číslo pórovitosti. Při volbě této oedometrické zkoušky jako charakteristické byla kalibrace této sady úspěšná.

V tab. 5.2 jsou uvedeny tři kalibrace různých odběrů sady Kolný, i přestože sada Kolný nabízí ke kalibraci celkem 34 možných sad experimentů. Tento přístup byl zvolen, jelikož k charakterizaci celé této sady experimentálních dat postačí charakterizace pouze tři odběrů, a to takových, aby charakterizovaly možné minimum, maximum a průměr z dominantního průběhu pracovního diagramu sady Kolný (obr. 5.2).

Kalibrace všech sad jsou vyobrazeny v obr. 5.3a-c. Podobně jako v případě kalibrace databáze jemnozrnných zemin, je nutné dodat, že obr. 5.3 má spíše ilustrační charakter, který pouze demonstruje množství nakalibrovaných laboratorních experimentů. Celkově bylo nakalibrováno celkem 40 laboratorních experimentů, z čehož je 15 zkoušek oedometrických a 25 zkoušek drénovaných trojosých, všechny na rekonstituovaných (rozvolněných) vzorcích.



Obr. 5.2: Průběhy vybraných odběrů ze sady Kolný



Obr. 5.3: Grafy nakalibrovaných hrubozrnných sad, a) a b) drénované trojosé zkoušky na rek. vzorcích, c) oedometrické zkoušky na rek. vzorku

6 POSOUZENÍ KALIBRAČNÍ APLIKACE

Kalibrační aplikace byla vyvíjena na ČVUT, fakultě Stavební, kolegy Ing. Tomášem Janotou, Ph.D, Ing. Tomášem Kadlíčkem a Ing. Štěpánem Benešem. První verze byla napsána v interpretačním programovacím jazyce Matlab a byla rozdělena do dvou samostatných aplikací, nesoucí názvy HypoClay a HypoSand. Každá z těchto částí aplikace implementovala jiný konstituční model: HypoClay obsahovala konstituční model pro jemnozrnné zeminy a HypoSand obsahovala konstituční model pro hrubozrnné zeminy (více o konst. modelech v kap. 2 a 3). Kód kalibrační aplikace byl později převeden do jazyka C# a v rámci tohoto kroku byla zároveň aplikace předělána na webovou aplikaci. Tato aplikace je v současné době veřejně přístupná na soilmodels.com/excalibre/. Je zajímavé, že výpočet první verze kalibrační aplikace ve verzi Matlab trval v rozsahu 2-10 hodin na jednu úlohu, kdežto webová aplikace tu samou úlohu zvládne v rámci jedné minuty.

6.1 První verze kalibrační aplikace

V první verzi kalibrační aplikace bylo hlavním cílem testování vyzkoušet samotnou funkčnost programu. Cílem bylo zjistit, že dokáže kalibraci dle pravidel konstitučních modelů provést. Jak se ukázalo, tak již první verze je silným nástrojem, který do budoucna jistě najde své využití. V první verzi kalibrační aplikace se vyskytly nepřesnosti a potíže, které budou popsány v následující kapitole.

6.1.1 Automatická kalibrace jemnozrnných zemin

Část kalibrační aplikace, používaná pro kalibraci konstitučního modelu pro jemnozrnné zeminy byla nazvána HypoClay. Použití aplikace HypoClay bylo v zásadě jednoduché. Zapotřebí bylo mít data pro kalibraci připravená ve správném formátu (více v kap. 4 a 5), která byla vložena do složky s kalibrační aplikací ve formátu „DATA.xlsx“, a následně byla aplikace spuštěna pomocí příkazového řádku, kde zároveň byl vidět průběh kalibrace nebo chyby, které se vyskytly během kalibrace.

Postup kalibrace prováděnou aplikací, byl takový, že HypoClay si v datech vytáhl nejprve oedometrickou zkoušku, na které nakalibroval parametry λ , κ a N . Po zjištění první části parametrů modelu aplikace kalibrovala buď sadu trojosých zkoušek na rekonstituovaném vzorku nebo na neporušeném a příslušné zbývající parametry φ_c a v . Tímto způsobem vzniklo v zásadě více než jedna sada parametrů, a tudíž bylo vytvořeno tolik sad parametrů, kolik bylo oedometrických zkoušek, které byly znásobené počtem druhů trojosých zkoušek. Jinými slovy: abychom získali právě jednu sadu parametrů, museli bychom do vstupních dat vložit pouze jednu oedometrickou zkoušku a k ní jednu sadu trojosých zkoušek např. na rekonstituovaném vzorku. Aplikace navíc nerozlišovala, jestli je daná oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku nebo na vzorku neporušeném, což je pro kalibrování směrnice stlačovací větve, neboli NCL, zásadní. Nelze zaručit, že zatěžovací

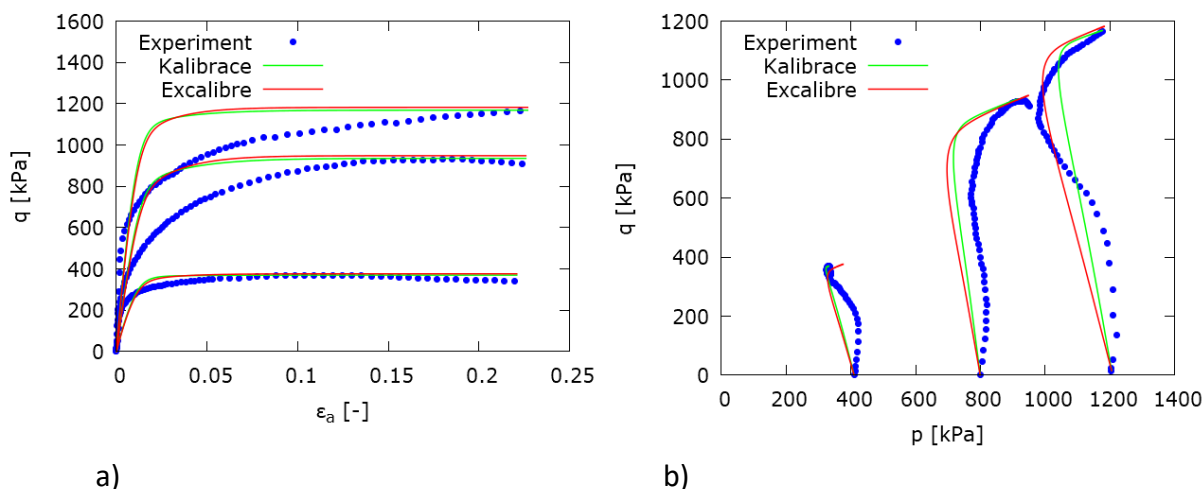
větev oedometru na neporušeném vzorku se pohybuje po NCL, a tudíž směrnice λ nemusí být reprezentativní. Proto vznikaly mezi nakalibrovanými sadami parametrů velké nuance. Pro následné srovnání byla vždy použita pouze jedna sada, která patřila rekonstituovanému oedometru a rekonstituovaným trojosým zkouškám. Pro ukázkou jsou v tabulce 6.1 ukázány nakalibrované sady parametrů pro sadu Bílina 49703. Tato experimentální sada obsahuje oedometrické a nedrénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných i neporušených vzorcích. Jak je vidět v tab. 6.1, byly nakalibrovány celkem 4 sady parametrů konstitučního modelu.

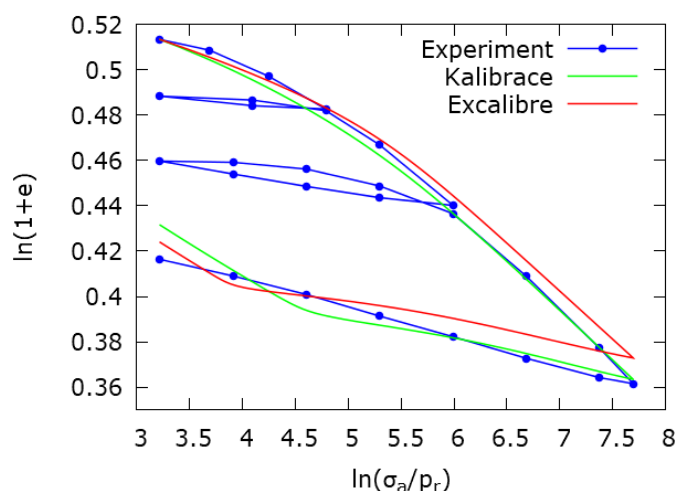
Tabulka 6.1: Tabulka sad parametrů pro různé kombinace OED a CIUP

	φ_c	λ	κ	N	ν
OED-NAT-1,CIUP-NAT	24,435	0,03342	0,0083	0,6208	0,2708
OED-NAT-1,CIUP-REC	24,211	0,03342	0,0083	0,6208	0,3651
OED-REC-1,CIUP-NAT	24,435	0,04804	0,0158	0,8423	0,1390
OED-REC-1,CIUP-REC	24,211	0,04804	0,0158	0,8423	0,2801

Tímto způsobem bylo pomocí kalibrační aplikace kalibrováno a následně porovnáno celkem 12 experimentálních sad. Tento počet srovnaných experimentálních sad byl pro první ohledání funkčnosti kalibrační aplikace určené pro jemnozrnné zeminy dostačující.

Jako reprezentační sadu obvyklého výsledku byla zvolena sada Bílina 46609, která představuje ideální sadu pro kalibrační aplikaci, a tudíž i výsledek její automatické kalibrace je v zásadě správný. Při kalibracích této sady a sad jí podobných docházelo k chybné kalibraci oedometrických zkoušek, kde je v obr. 6.1c vidět určitá odchylka od kalibrace ruční a experimentálních dat. Tato odchylka je způsobena dosud chybějícím přepočtem inženýrských přetvoření na přirozená v rámci aplikace. Tento problém se vyskytuje ve všech porovnávaných sadách první verze HypoClay. Výsledky srovnání reprezentační sady Bílina 46609 je vidět na obr. 6.1a-c.

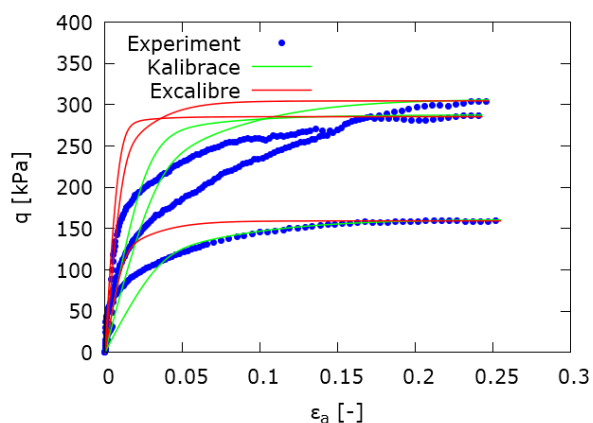




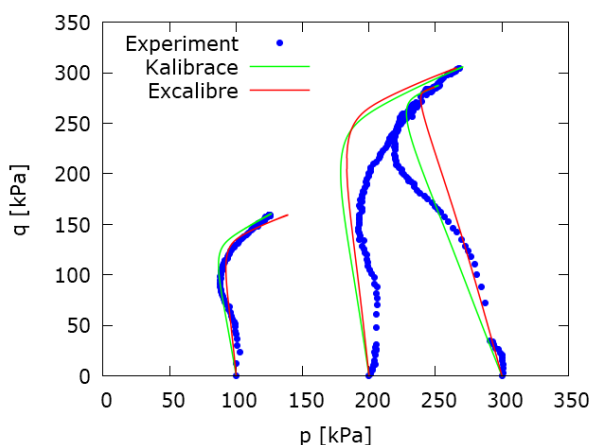
c)

Obr. 6.1: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Bílina 46609, a) a b) nedrénovaná trojosá zkouška na rekonstituovaném vzorku, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku

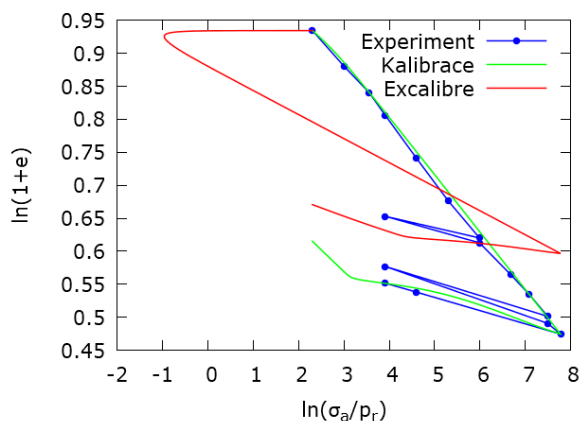
Mnohem zajímavější výsledek byl zjištěn v případě automatické kalibrace experimentální sady Prackovice. Tato experimentální sada obsahuje 2 rekonstituované a 2 neporušené oedometry a tři nedrénované rekonstituované trojosé zkoušky. Výsledky srovnání jsou vidět na obr. 6.2a-d. Kalibrační aplikace v tomto případě zjistila nerealistické parametry, reprezentující chování při stlačení. Tento problém byl způsoben tím, že aplikace pro určení směrnice λ , která reprezentuje směrnici NCL, brala poslední dva přitěžovací body předtím, než došlo k odlehčování vzorku v oedometru. V případě sady Prackovice jsou experimentální data neideální - tyto dva poslední body jsou pro směrnici NCL nereprezentativní.



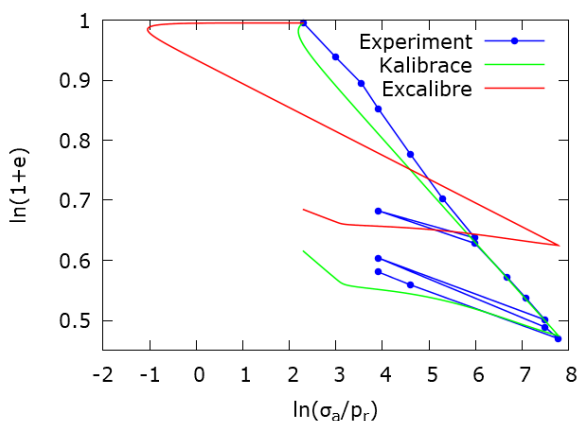
a)



b)



c)

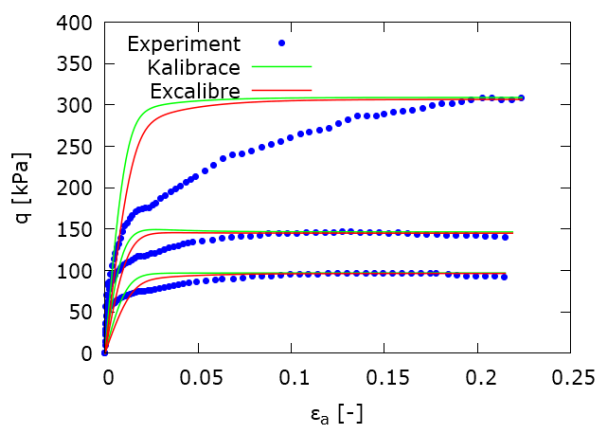


d)

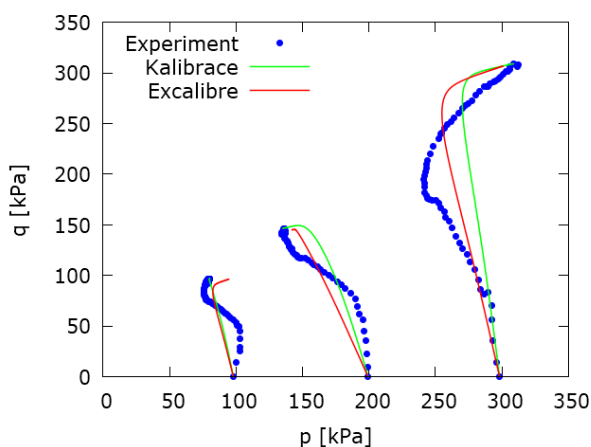
Obr. 6.2: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Prackovice, a) a b) nedrénovaná trojosá zkouška na rekonstituovaném vzorku, c) a d) oedometrické zkoušky na rekonstituovaném vzorku

Podobné výsledky jsou i v sadě Senec, kde je efekt posledních dvou zatěžovacích bodů a nepřepočítání přirozených přetvoření velmi dobře patrný (obr. 6.3a-c).

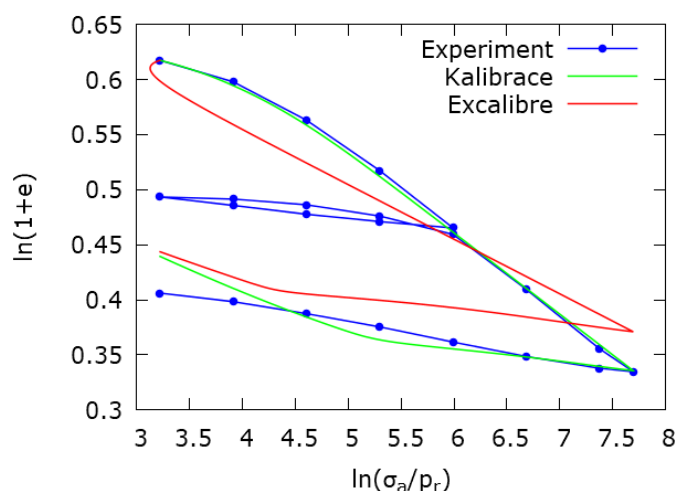
Ve vybraných dvanácti sadách, které byly srovnány s automatickou kalibrací, samozřejmě nechybí speciální sada Újezd pod Troskami, jež obsahuje místo nedrénovaných trojosých zkoušek pouze drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích, výsledky srovnání jsou poté k vidění na obr. 6.4a-f.



a)



b)

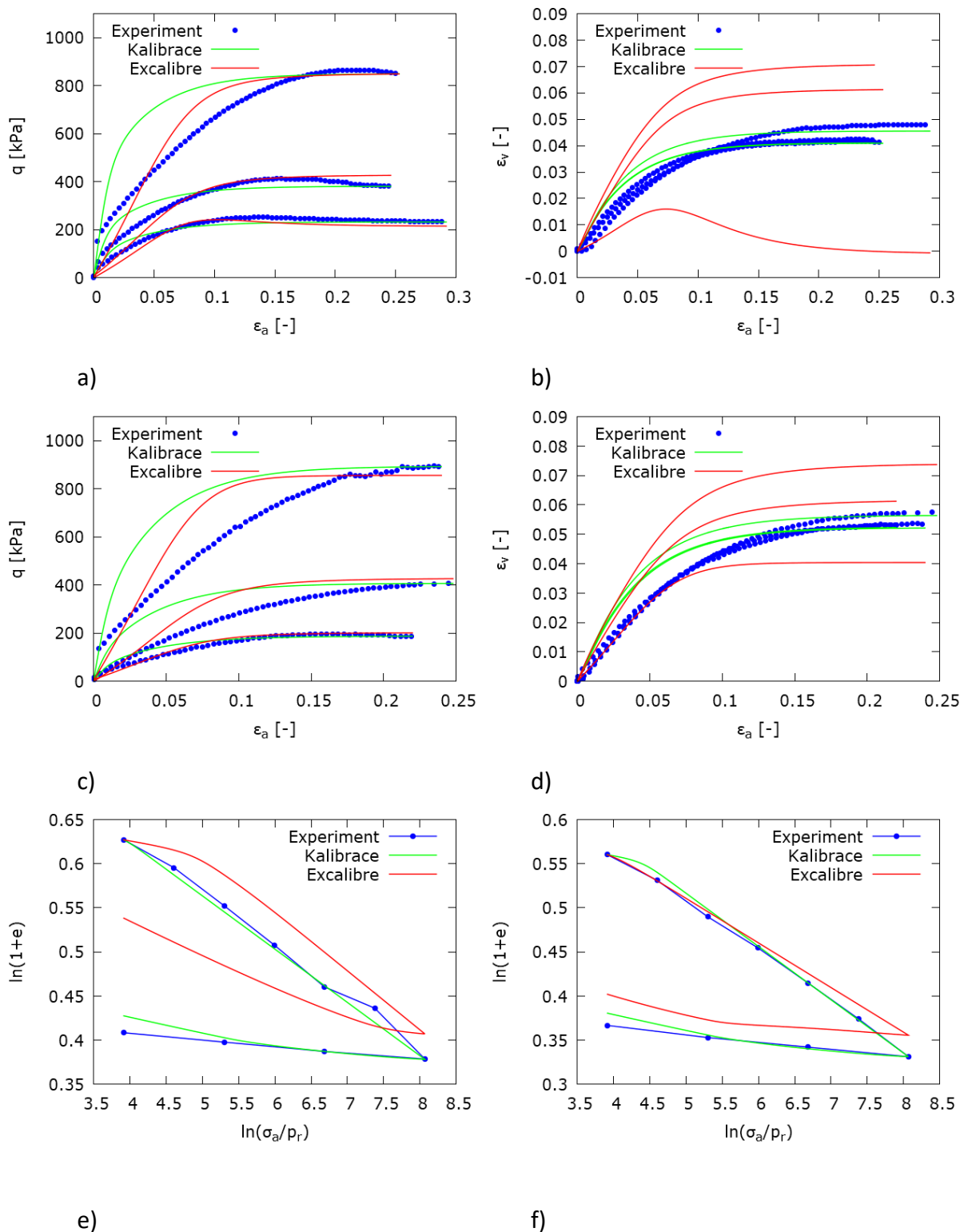


c)

Obr. 6.3: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Senec, a) a b) nedrénovaná trojosá zkouška na rekonstituovaném vzorku, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku

Při srovnání ruční kalibrace a automatické kalibrace na experimentální sadě Újezd pod Troskami je opět dobře zřetelný problém dvou posledních zatěžovacích bodů, kde v prvním oedometru je u předposledního zatěžovacího bodu zřetelná experimentální chyba. Tato chyba byla při ruční kalibraci zanedbána. Zároveň byl zajímavý výsledek kalibrace drénovaných zkoušek, která probíhá podobně jako v případě nedrénovaných zkoušek, ale ne stejně. Kalibrační aplikace kalibrovala tyto zkoušky, podobně jako v případě nedrénovaných zkoušek, ze zobrazení q vůči ϵ_a a q vůči p . Tento přístup není pro drénované triaxiální zkoušky správný, jelikož v případě této zkoušky je v zobrazení q vůči p přímka ve směrnici rovnou 3, správně má kalibrace drénovaných testů probíhat ze zobrazení q vůči ϵ_a a ϵ_v vůči ϵ_a . Kalibrace v zásadě nedopadla špatně, ale jsou v ní nepřesnosti v simulaci objemových přetvoření, které byly zřejmě způsobeny i nepřesnostmi v odhadu parametrů ovlivňujících chování při stlačení.

V simulacích drénovaných trojosých zkoušek docházelo i v dalších fázích testování k těžkostem, a to zejména v simulacích objemových přetvoření. Tyto problémy byly způsobeny tím, že při simulaci drénovaných zkoušek jsou dva parametry ovlivňující chování při porušení kalibrovány pouze ze zobrazení q vůči ϵ_a , navíc je důležité při této kalibraci fitovat i vrcholový stav, který je ovlivňován zadaným počátečním číslem pórovitosti. V případě nedrénovaných zkoušek, které jsou pro kalibraci modelu pro jemnozrnné zeminy vhodnější, dochází ke kalibraci dvou parametrů ovlivňujících chování při porušení samostatně z různých zobrazení, což je pro uživatele modelu, jež jej chce nakalibrovat, tak i pro kalibrační aplikaci, mnohem jednodušší. Tyto důvody vedly v druhé fázi testování kalibrační aplikace k dokalibrování dvou experimentálních sad, které byly do databáze dodatečně dodány, a které obsahují drénované i nedrénované trojosé zkoušky zároveň.



Obr. 6.4: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Újezd pod Troskami, a) až d) drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích, e) a f) oedometrické zkoušky na rekonstituovaném vzorku

V automaticky nakalibrovaných datech experimentální sady Újezd pod Troskami může být k vidění ještě jeden fenomén, a to na obr. 6.4e, kde odlehčovací větev automaticky

kalibrovaného oedometru neodpovídá experimentálním datům. Fenomén z obr. 6.4e může působit jako chyba kalibrace, nicméně v kap. 4.1 byla popsána problematická ruční kalibrace této sady, kde bylo uvedeno, že kalibrace parametru v nebyla přesná. Parametr v , který představuje směrnici tuhosti v zobrazení q vůči ϵ_a , byl zvolen na hodnotu 0,35, jelikož výsledky ruční kalibrace byly pro původně nakalibrované hodnoty tohoto parametru v nerealistické. Tento fakt je k vidění i zde, parametr v má podstatný vliv na odlehčovací větve oedometru, zejména když se jeho hodnoty blíží svému maximu. Jinými slovy je automatická kalibrace v tomto případě správná a jedná se spíše o problém experimentálních dat, nežli automatické kalibrace. V případě ruční kalibrace bylo do výsledků zasaženo zvolením tohoto parametru tak, aby výsledky kalibrace byly realistické. Z tohoto důvodu je ve výsledné kalibrační aplikaci možnost uživatelsky do výsledků kalibrace zasáhnout (více v kap. 6.3).

6.1.2 Automatická kalibrace hrubozrnných zemin

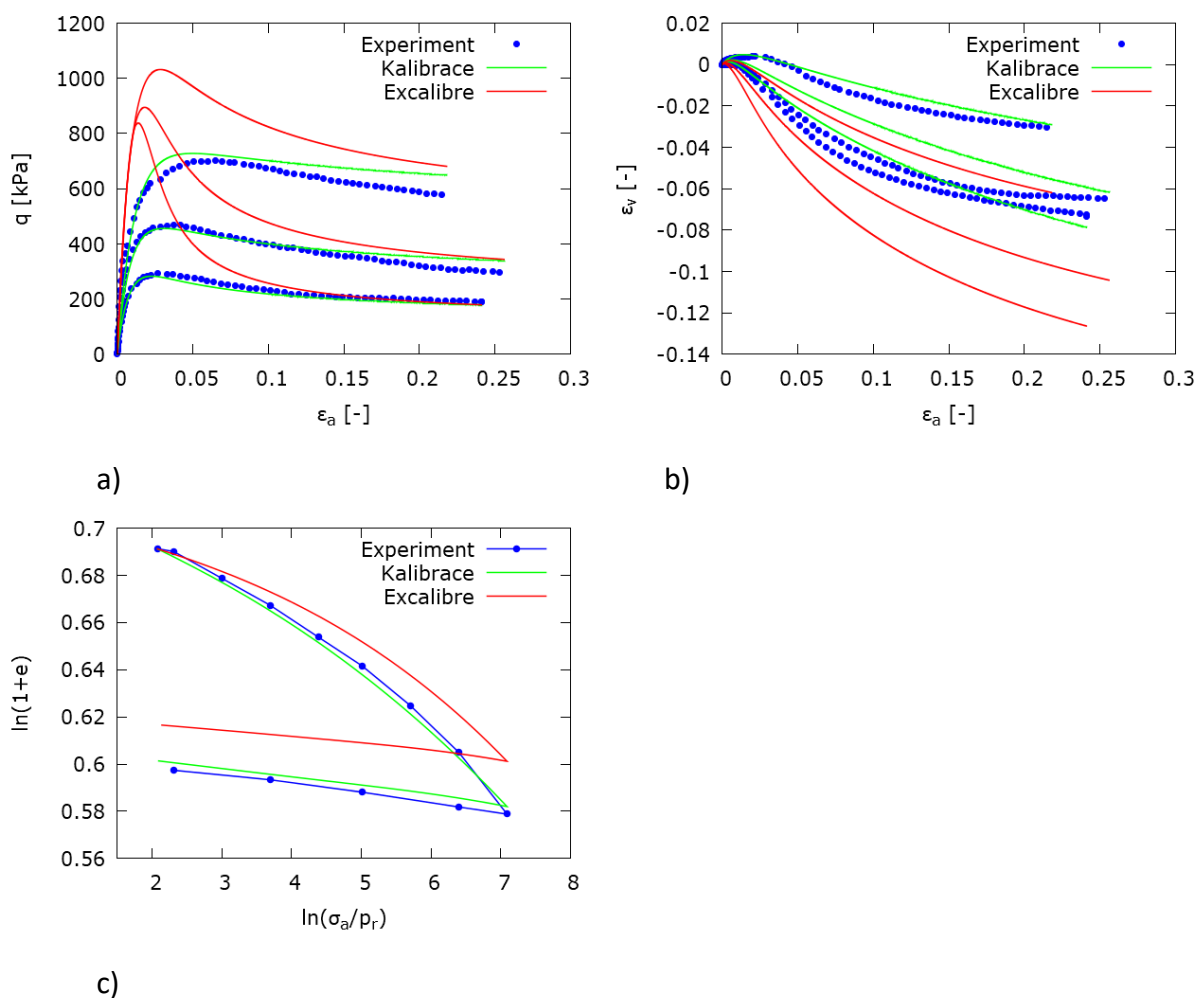
Podobně jako v případě automatické kalibrace jemnozrnných sad vzorků první verze kalibrační aplikace byly pro kalibrování sad hrubozrnných vzorků používána samostatná aplikace, jež představuje druhou část kompletní kalibrační aplikace. Použití této aplikace je v stejné, jako v případě první verze kalibrační aplikace pro jemnozrnné vzorky, a nese název HypoSand.

Funkcionalita této druhé části kalibrační aplikace je stejná jako v případě HypoClay, s tím rozdílem, že je kalibrován konstituční model určený pro hrubozrnné materiály. Kalibrace konstitučního modelu pro hrubozrnné materiály je odlišná od kalibrace konstitučního modelu pro jíly. Jako v případě HypoClay, tak pro každý oedometr v experimentální sadě v HypoSand vznikla jedna sada parametrů. Experimentální sady jsou naštěstí zjednodušené, jelikož obsahují pouze rekonstituované (rozvolněné) vzorky. Jinými slovy je počet parametrických sad, které aplikace určí je roven počtu oedometrických zkoušek v sadě experimentálních zkoušek. Srovnání v tomto případě probíhalo v zásadě jednoduše, a to protože většina experimentálních sad má pouze jednu oedometrickou zkoušku. V případě většího počtu oedometrických zkoušek v experimentální sadě probíhalo srovnání vždy pro daný oedometr samostatně (srovnání jednoho oedometru společně s trojosými zkouškami).

Tímto způsobem bylo automaticky kalibrováno a srovnáno celkem 6 experimentálních sad hrubozrnných vzorků. Během srovnávání se vyskytlo velké množství problémů v nekonzistenci kalibrace, proto více experimentálních sad v první fázi posouzení hrubozrnné části aplikace nebylo srovnáno.

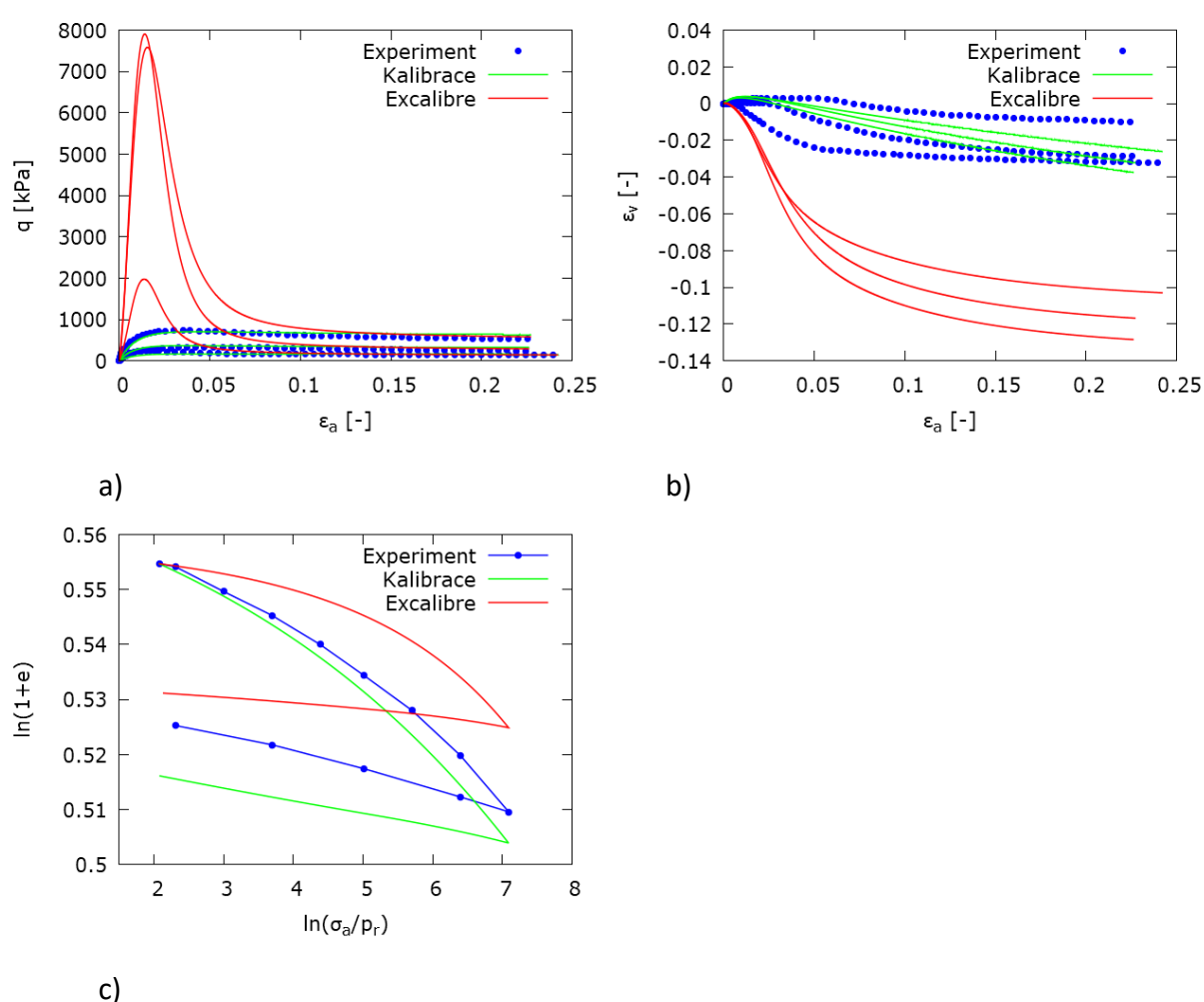
Bohužel, při srovnávání výsledků z kalibrační aplikace pro hrubozrnnou část nelze určit reprezentační vzorek výsledků, jako v případě části jemnozrnné. Kalibrované sady byly v první fázi testování nekonzistentní s experimentálními výsledky a s ruční kalibrací, proto budou uvedeny tři sady, které představí nejhorší a zároveň nejlepší výsledky v této fázi testování.

První uvedenou sadou ke srovnání je experimentální sada Dobřany. Tato experimentální sada obsahuje jednu zkoušku sypného úhlu, jednu zkoušku oedometrickou a tři zkoušky trojosé za drénovaných podmínek, všechny tyto zkoušky na rekonstituovaných (rozvolněných) vzorcích. Výsledky srovnání jsou uvedeny v obr. 6.5a-c. Jak je vidět, nedopadla automatická kalibrace hrubozrnných sad, na rozdíl ručního kalibrování, příliš příznivě. Výsledek této experimentální sady lze brát jako průměrně příznivý výsledek. Je vidět, že automatická kalibrace není realistická, zároveň není příliš vzdálena od kalibrace ruční. V případě oedometru byla zásadní chyba pouze ve špatné hodnotě parametru h_s , který řídí sklon oedometrické zkoušky. V případě automatické kalibrace byla tato hodnota správně spočítána za pomoci směrnic z oedometrických experimentálních dat, ale nebyla následně upravena tak, aby simulace souhlasila s experimentem, jako v případě kalibrace ruční. Zakřivení oedometrické zkoušky, který řídí parametr modelu n , je správné. V případě trojosých zkoušek je chyba ve fitování vrcholového stavu a směřnici tuhosti, které řídí parametry α a β modelu. Problém špatné kalibrace parametrů α a β modelu se s rozdíly vyskytuje ve všech experimentálních sadách srovnávaných v první fázi kalibrační aplikace pro hrubozrnné vzorky.



Obr. 6.5: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Dobřany, a) a b) drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku

Nyní bude uveden výsledek srovnání experimentální sady Rohatec. Tato experimentální sada představuje nejhorší výsledek v první fázi srovnání automatické kalibrace s ruční pro hrubozrnné vzorky. Sada Rohatec obsahuje jednu zkoušku sypného úhlu, dvě oedometrické zkoušky a tři drénované triaxiální zkoušky na rekonstituovaných vzorcích. Problémy v automatické kalibraci jsou stejné jako v případě sady Dobřany, avšak zde jsou výsledky automatické kalibrace extrémně nepříznivé, hlavně v případě simulace triaxiálních zkoušek, výsledky jsou uvedeny v obr. 6.6a-c.

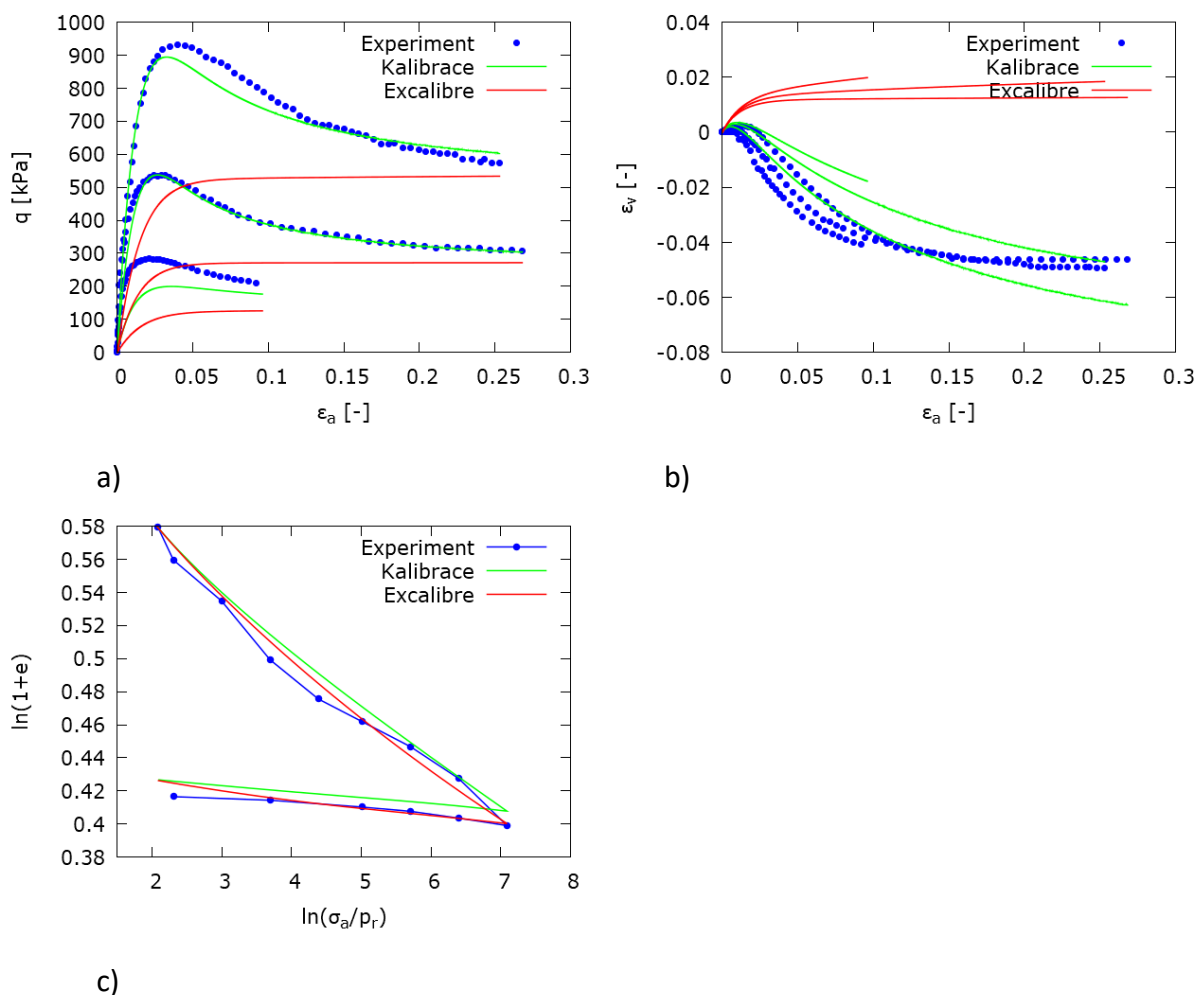


Obr. 6.6: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Rohatec, a) a b) drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku

Na první pohled se může zdát, že ruční kalibrace prvního oedometru ze sady není správná. Nepřesnost v simulaci prvního oedometru je způsobena tím, že pro charakterizaci sady experimentálních dat je za ideálních podmínek potřeba jedna sada parametrů modelu,

avšak pokud sada obsahuje více než jednu oedometrickou zkoušku, které navíc nemají podobné či stejné počáteční číslo pórovitosti, nelze tyto dvě a více zkoušek charakterizovat pouze jedním parametrem h_s , který řídí její sklon limitujících křivek modelu. Jinými slovy, každá z těchto dvou a více oedometrických zkoušek by musela mít rozdílný parametr h_s , proto je pro jejich charakterizaci zvolena taková hodnota h_s , aby co nejlépe charakterizoval všechny oedometrické zkoušky, resp. průměrná hodnota.

Nakonec bude uveden jeden z příznivějších výsledků automatické kalibrace pro hrubozrnné sady, kterou představuje experimentální sada s názvem Hrušovany, tato sada obsahuje kromě jedné oedometrické zkoušky také tři drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích a zároveň zkoušku úhlu přirozené sklonitosti. Výsledky srovnání jsou k vidění v obr. 6.7a-c. Jak je vidět, tak simulace oedometrické zkoušky je velice přesná, dokonce přesnější než v případě ruční kalibrace. Simulace trojosých zkoušek naopak vůbec příznivé nejsou a simulace vrcholového stavu je značně podhodnocena, podobně jako charakterizace smykové tuhosti.



Obr. 6.7: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Hrušovany, a) a b) drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku

Z průzkumu výsledků srovnání se nedalo přesně určit, v čem byl problém kalibrace v simulacích trojosých zkoušek, jelikož simulace byly náhodně buď extrémně nadhodnoceny či naopak podhodnoceny. Později se ukázalo, že uvedený problém byl způsobený chybou v algoritmu kalibrační aplikace, jež měla na svědomí právě tento fit. I přes nepříznivé výsledky první verze programu HypoSand se však ukázalo, že i část kalibrační aplikace, určená pro hrubozrnné materiály, dokáže s daty pracovat a její doladění nebude značný problém, jak se v počátcích předpokládalo.

6.2 Druhá verze kalibrační aplikace

V druhé fázi testů kalibračních aplikací, kde funkčnost aplikací byla již otestována fází první, bylo úkolem ověřit, zdali se programátorům aplikace z ČVUT podařilo odladit problémy vzniklé v první verzi během automatické kalibrace. Nedostatky kalibrační aplikace byly řádně s kolegy ladící aplikaci diskutovány a i v druhé verzi kalibrační aplikace byla aplikace rozdělena na dvě části po vzoru první verze, jedna pro jemnozrnné zeminy (HypoClay) a druhá pro zeminy hrubozrnné (HypoSand).

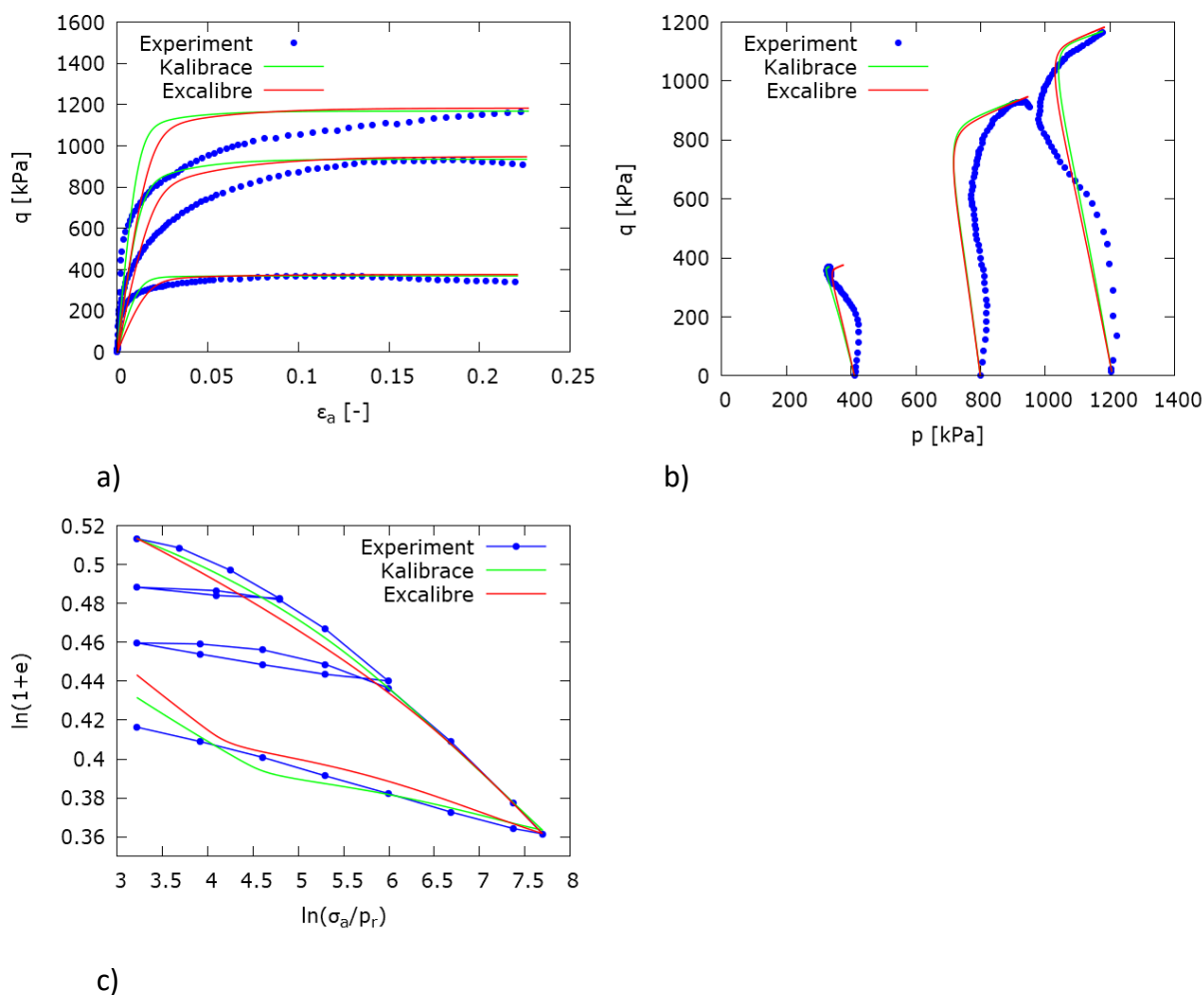
Výsledky z druhé fáze testování automatické kalibrace jsou mnohem příznivější, než v první verzi kalibrační aplikace, avšak jisté nesrovnalosti byly také nalezeny. Srovnávání výsledků probíhalo stejně jako v první fázi testování.

Po zhodnocení kalibrační aplikace v první a druhé fázi testů, kde byly odhaleny hlavní nedostatky aplikace ExCalibre, byly provedeny série testů aplikace, ve kterých byly odhalovány drobné nedostatky, které s funkcionalitou kalibračního procesu nesouvisely. Na sérii těchto drobných testů a problémů s aplikací se autor této práce již nepodílel.

6.2.1 Automatická kalibrace jemnozrnných zemin

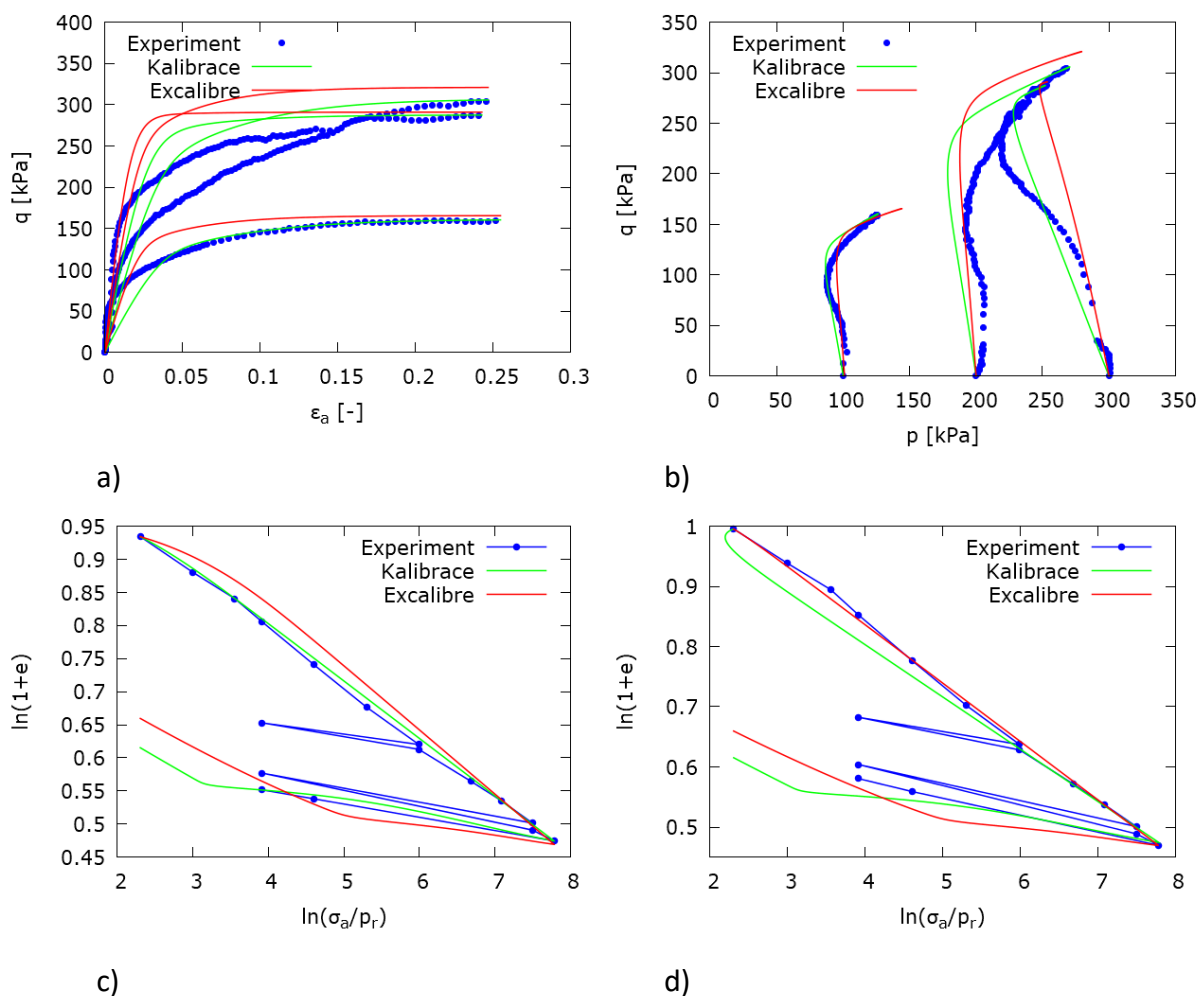
Použití a cíl druhé fáze testování kalibrační aplikace pro jemnozrnné zeminy byl stejný jako v první verzi těchto testů, stejně jako nezměněná funkcionalita aplikace. Výsledkem kalibrační aplikace verze druhé bylo tedy několik parametrových sad, které byly rozdělené dle oedometrických zkoušek a příslušným trojosých zkoušek, podobně jako je to popsáno v kap. 6.1.1.

Většina testovaných experimentálních sad vyšla velmi příznivě, proto bude na ukázkou uvedena sada Bílina 46609 jako reprezentační. Tato sada poslouží jako ukáзка funkčnosti aplikace a zároveň bude představovat ideální a běžný výsledek kalibrací druhé fáze testování aplikace HypoClay. Výsledky srovnání jsou v obr. 6.8a-c. Jak je z výsledků kalibrace vidět, tak vyšla správně. Na rozdíl od první verze aplikace byl v druhé verzi aplikace opraven efekt nepřepočítání inženýrských přetvoření na přirozená.



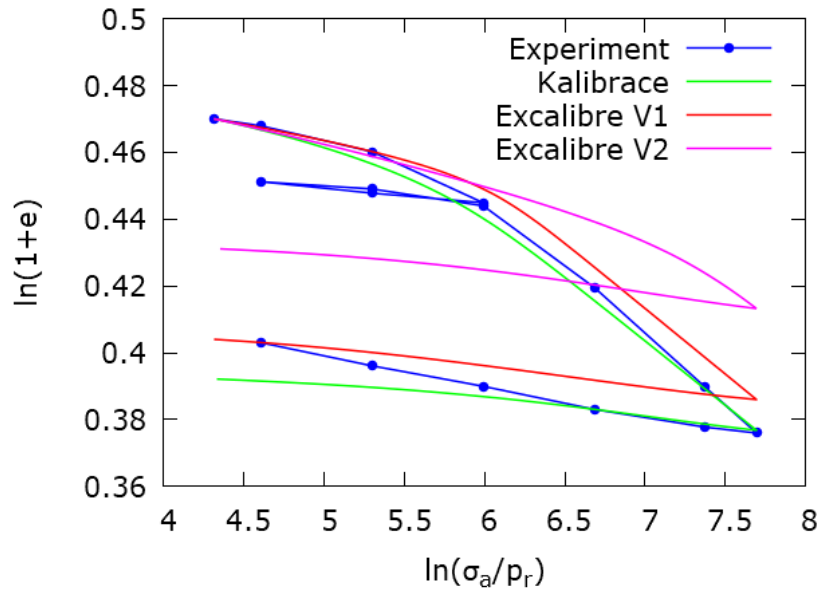
Obr. 6.8: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Bílina 46609 druhé verze, a) a b) nedrénovaná trojosá zkouška na rekonstituovaném vzorku, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku

Ještě lepší ukázkou toho, že kalibrační aplikace byla v této verzi dobře odladěná, představuje automatická kalibrace experimentální sady Prackovice. Experimentální sada Prackovice vyšla v první verzi kalibrace velmi nepříznivě, kvůli neideálnosti oedometrických měření. Na obr. 6.9a-d je vidět, že i tento efekt byl dobře odladěn a automatická kalibrace experimentální sady Prackovice je úspěšná. Kalibrační aplikace v této fázi již funguje správně, což dokazují ukázkové výsledky, které jsou dobrým výsledkem většiny úspěšně kalibrovaných sad pomocí kalibrační aplikace HypoClay druhé verze.



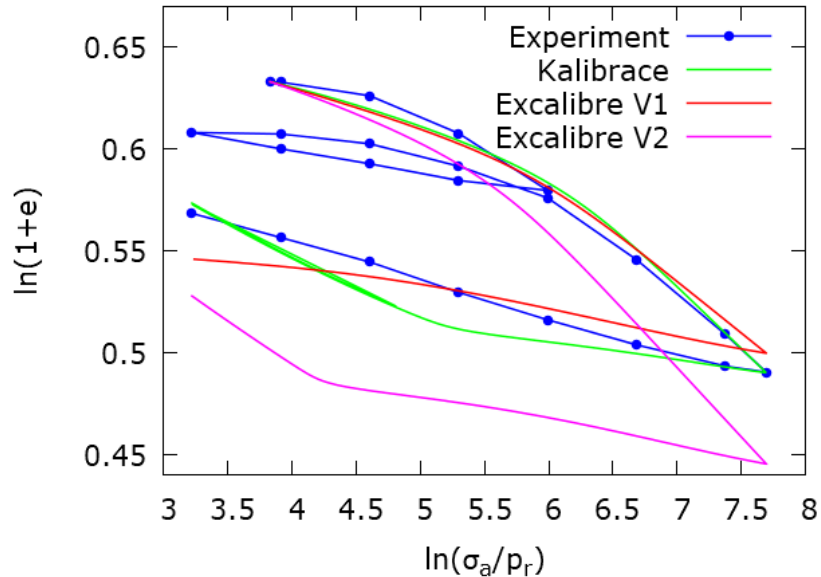
Obr. 6.9: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Prackovice druhé verze, a) a b) nedrénovaná trojosá zkouška na rekonstituovaném vzorku, c) a d) oedometrické zkoušky na rekonstituovaném vzorku

V první verzi kalibrační aplikace pro jemnozrnné zeminy nebyl diskutován jeden fenomén, který se překvapivě v druhé verzi kalibrační aplikace ukázal jako problémový, a to simulace oedometrických experimentů na neporušených vzorcích. V první verzi kalibrační aplikace byla simulace neporušených oedometrických experimentů zdánlivě úspěšná, podobně jako simulace rekonstituovaných oedometrů. Druhá verze kalibrační aplikace tyto zkoušky simuluje špatně. Na obr. 6.10 je ukázka oedometrické simulace na neporušeném vzorku pocházejícího ze sady Hájek. V obr. 6.10 je vidět, že v první verzi kalibrační aplikace, s přihlédnutím na problém nepřepočítávání inženýrských přetvoření na inženýrská, je výsledek automatické kalibrace příznivější než ve druhé verzi.



Obr. 6.10: Srovnání první a druhé verze automatické pro neporušený vzorek ze sady Hájek

Podobný výsledek je vidět i v experimentální sadě Bílina 47076, kde v první verzi automatické kalibrace byl výsledek pro simulaci oedometrického experimentu pro neporušený vzorek příznivější, podobně jako v experimentální sadě Hájek. Výsledek tohoto srovnání je k vidění na obr. 6.11.

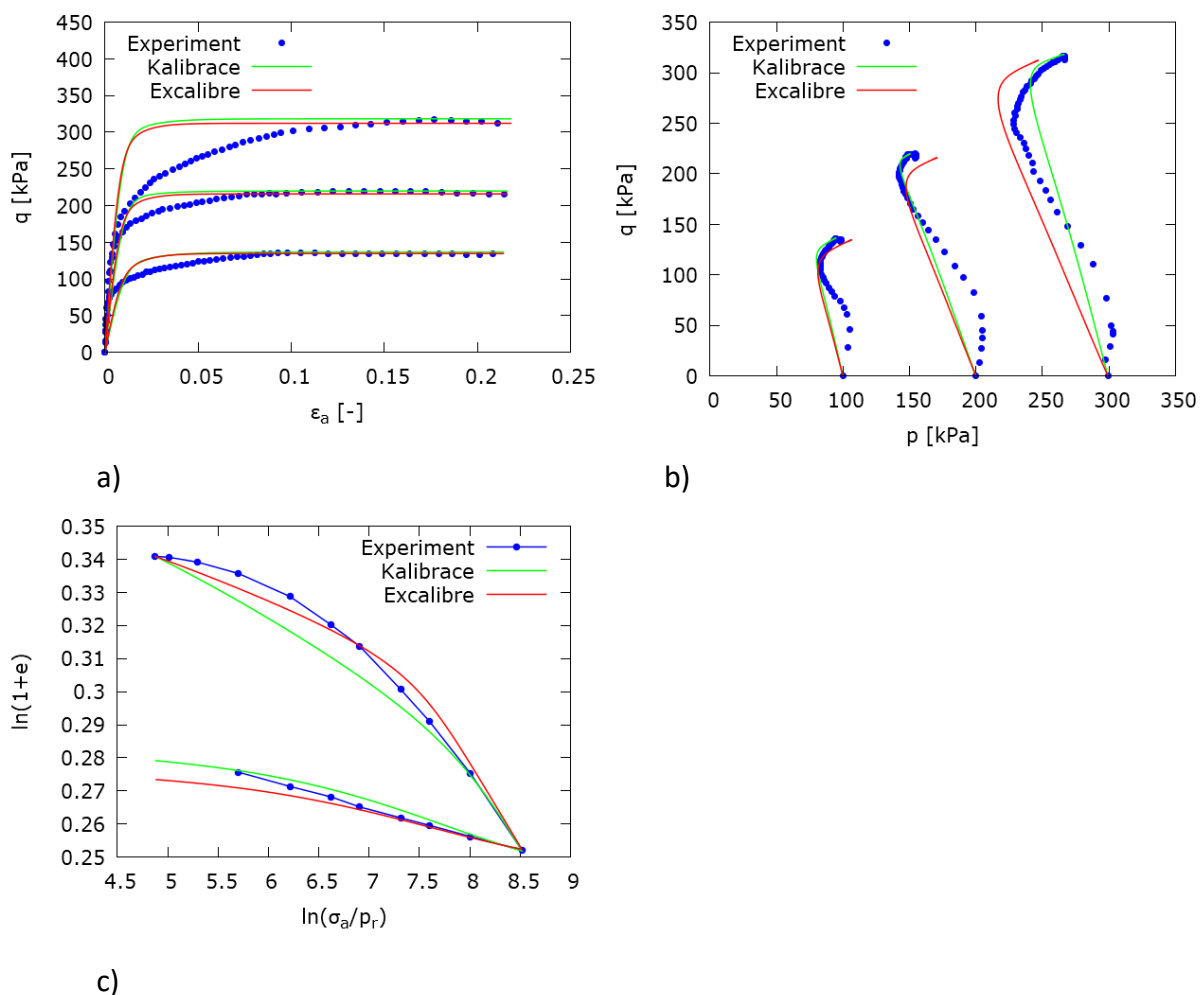


Obr. 6.11: Srovnání první a druhé verze automatické pro neporušený vzorek ze sady Bílina 47076

Výsledky těchto srovnání byly získány tak, že pro oedometrické zkoušky na neporušených vzorcích byla sada parametrů sestavena z parametrů pro oedometr na rekonstituovaném vzorku a pouze parametr N , udávající průsečík s osou $\ln(e+1)$ a polohu zkoušky stlačitelnosti, byl převzat ze sady parametrů pro oedometr na neporušeném vzorku.

Tímto způsobem bylo postupováno pro první i druhou verzi kalibrační aplikace HypoClay, stejně tak jako při ručních kalibracích. Jak je vidět v obr. 6.10 a 6.11, je v druhé verzi kalibrační aplikace problém v určení správného N_{nat} . Tento parametr určuje polohu oedometrické zkoušky na neporušeném vzorku. Problém špatně odhadnutého N_{nat} vzniká ve chvíli, kdy kalibrační aplikace kalibrovala parametry pro neporušený oedometr samostatně bez ohledu na to, že v sadě měla k dispozici experimentální data pro oedometr na rekonstituovaném vzorku.

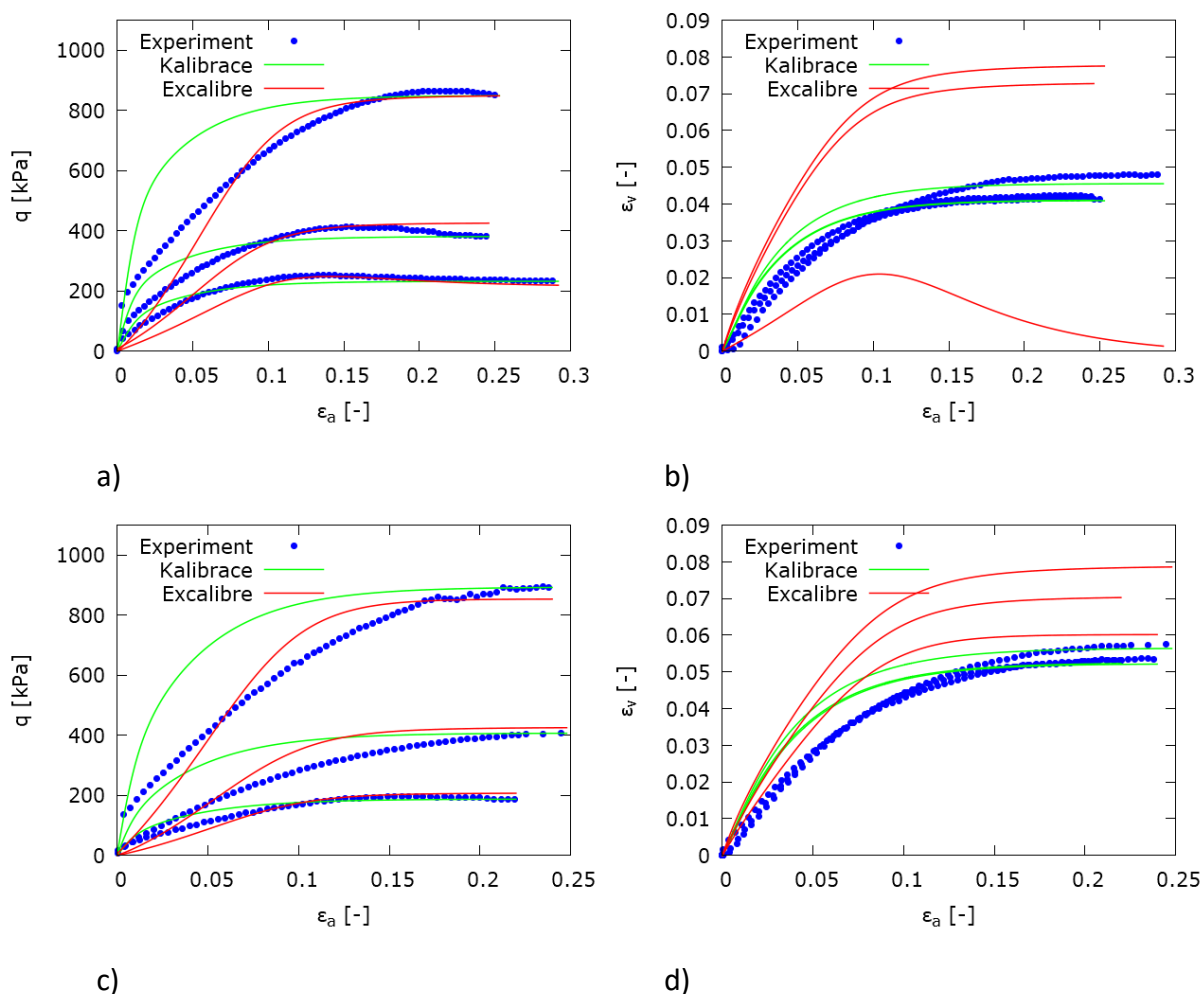
Samozřejmě může nastat situace, kdy v experimentální sadě oedometr na rekonstituovaném vzorku chybí, nicméně v takovém případě kalibrační aplikace funguje správně. Tento fakt je vidět na ukázce srovnání ruční a automatické kalibrace na experimentální sadě Metro 5A 36779. Tato experimentální sada obsahuje pouze jeden oedometr na neporušeném vzorku a 3 nedrénované trojosé zkoušky na neporušených a rekonstituovaných vzorcích. Automatická kalibrace experimentální sady Metro 5A 36779 představuje také úspěšně kalibrovanou experimentální sadu druhé verze kalibrační aplikace (obr. 6.12a-c).

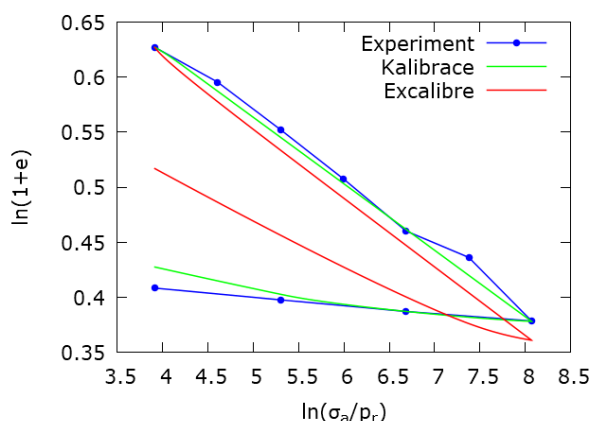


Obr. 6.12: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Metro 5A 36779 druhé verze, a) a b) nedrénovaná trojosá zkouška na rekonstituovaném vzorku, c) oedometrická zkouška na neporušeném vzorku

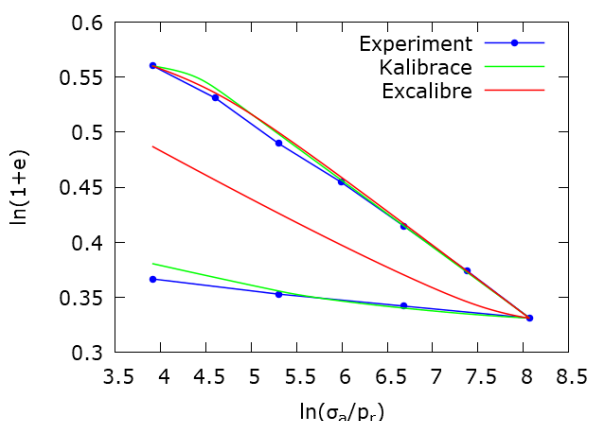
Podobně jako v první fázi testování, tak i v druhé bylo důležité prozkoumat chování kalibrační aplikace v případě kalibrování drénovaných trojosých zkoušek na vzorcích jemnozrnných zemin. Pro tento účel byla automaticky kalibrována sada Újezd pod Troskami, která se v první verzi kalibrační aplikace ukázala jako problémová. Další experimentální sady, které byly pro tento účel zkoumány, byly sady Hongkongkého jílu a jílu Weald, tyto sady pocházejí z dodatečného rozšíření databáze jemnozrnných zemin (kap. 4.2) a pro účely srovnání byly ručně dokalibrovány.

Kalibrace experimentální sady Újezd pod Troskami druhou verzí kalibrační aplikace pro jemnozrnné zeminy byla oproti první verzi kalibrace příznivější, ale ne zcela ideální. Výsledky srovnání jsou na obr. 6.13a-f. Simulace pomocí automatické kalibrace byla výrazně vylepšena, což se projevilo především v simulacích oedometrických zkoušek, které jsou již simulovány lépe. Problém ve fitování tuhosti v trojosých zkouškách, kterou představuje parametr modelu v , a která se v případě experimentální sady Újezd pod Troskami blížila své hraniční hodnotě, má obrovský vliv na simulaci odlehčovacích větví oedometrických zkoušek a v simulacích objemového přetvoření v trojosých testech. Tento efekt je dobře viditelný na obr. 6.13e a 6.13f, kde rozevřenost větví oedometrických zkoušek neodpovídá experimentálním datům.





e)



f)

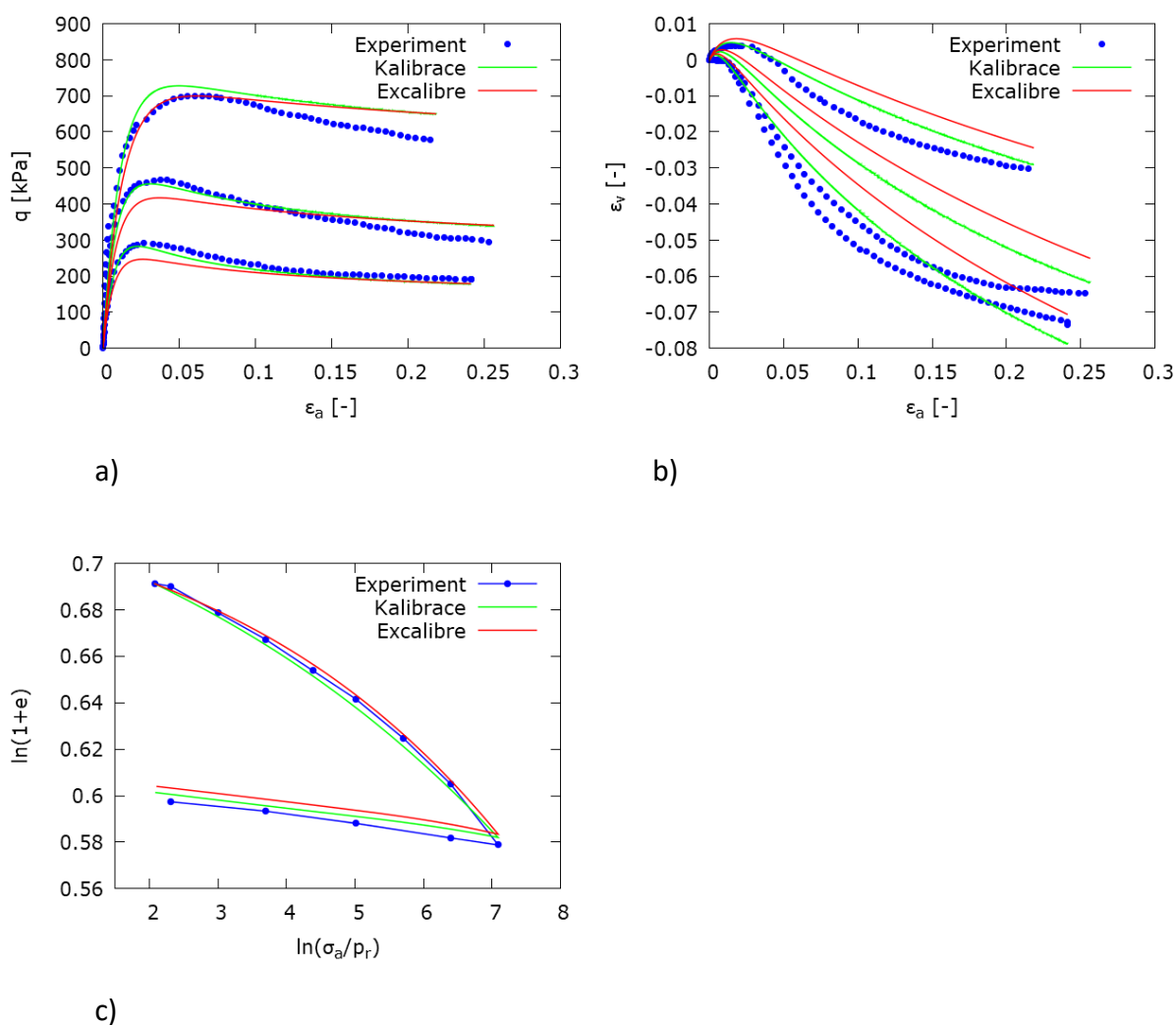
Obr. 6.13: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Újezd pod Troskami druhé verze, a) až d) drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích, e) a f) oedometrické zkoušky na rekonstituovaném vzorku

6.2.2 Automatická kalibrace hrubozrnných zemin

Část kalibrační aplikace druhé verze, která byla určena pro automatickou simulaci hrubozrnných experimentálních dat, byla označena jako HypoSand, podobně jako v první verzi této aplikace. Její použití bylo stejné jako v její první verzi. Zkoušení druhé verze aplikace mělo ověřit, zdali se podařily opravit problémy vznikající během kalibrací první verze. Během testů druhé verze kalibrační aplikace bylo celkově srovnáno sedm experimentálních sad, které byly pro účel otestování druhé a v podstatě i finální verze dostačující.

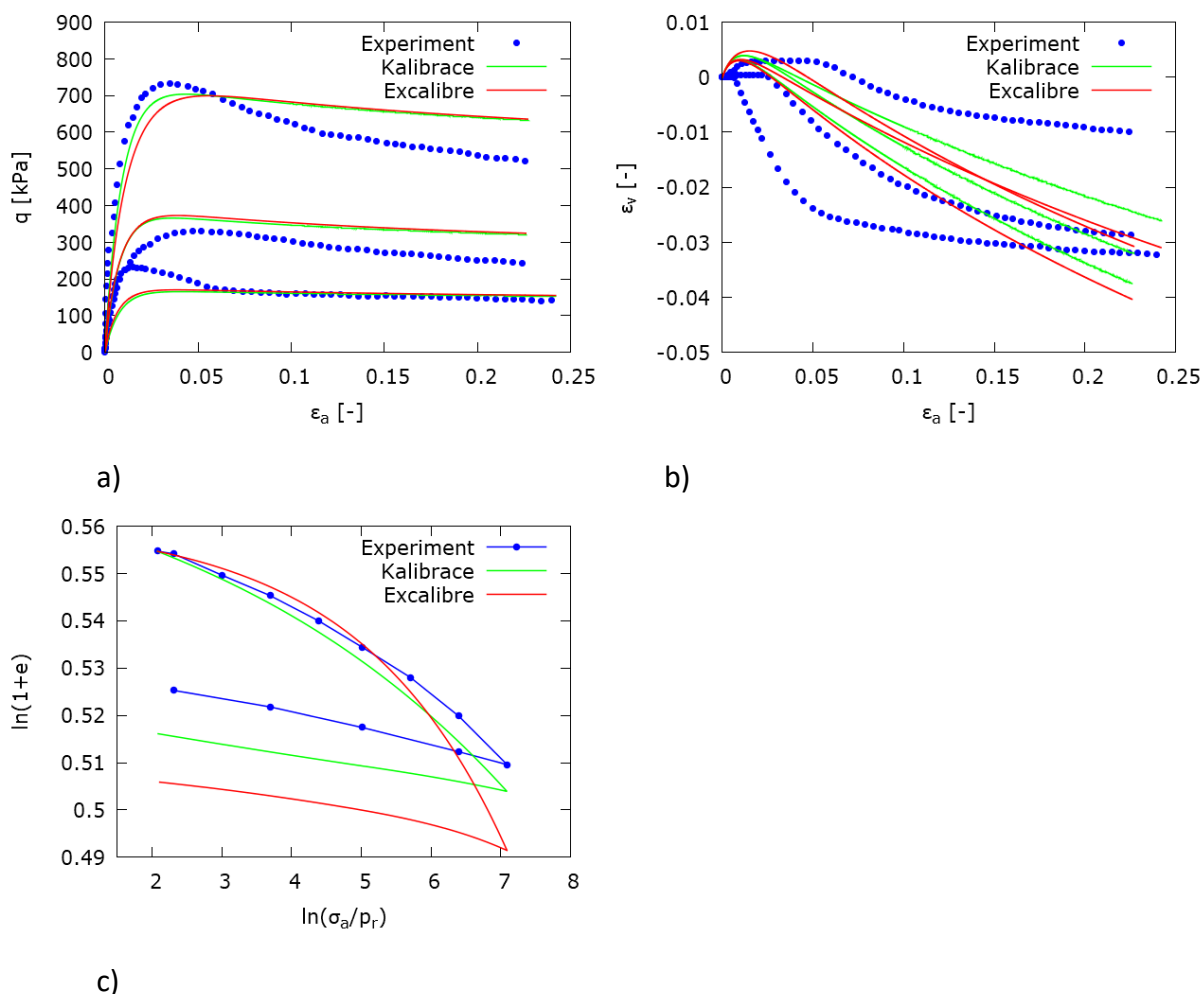
Jak se ukázalo z výsledků druhé verze kalibrační aplikace, tak výsledky, které byly z automatické kalibrace získány, jsou ve srovnání s první verzí aplikace správné, v některých případech dokonce i ideálnější než kalibrace ruční, které provedl autor této práce. V první verzi aplikace byly parametrické sady získané z automatizované kalibrace představeny uvedením výsledků tří experimentálních sad z databáze hrubozrnných vzorků. Tyto experimentální sady představovaly průměrné výsledky a extrémně přehodnocené či podhodnocené výsledky simulace, stejné sady budou tedy uvedeny znovu i v této sekci.

Experimentální sada Dobřany představovala v první verzi kalibrační aplikace sadu, jejíž kalibrace nebyla ideální, ale dá se říct, že nebyla špatná tolik, jako jiné simulace provedené kalibrační aplikací první verze. Výsledek experimentální sady Dobřany byl tedy vybrán k reprezentaci typických výsledků kalibrační aplikace pro hrubozrnné materiály první verze. Výsledky simulace verze druhé jsou vidět na obr. 6.14a-c. Jak je z výsledků kalibrace vidět, tak data z automatické kalibrace jsou téměř totožná s kalibrací ruční. Automatická kalibrace experimentální sady Dobřany byla v druhé verzi kalibrační aplikace úspěšná.



Obr. 6.14: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Dobřany druhé verze, a) a b) drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku

Další komentovanou simulací z kalibrační aplikace první verze byla experimentální sada Rohatec. Simulace experimentální sady Rohatec představovala nejhorší výsledek z první verze testů kalibrační aplikace pro hrubozrnné materiály, a to nejen kvůli špatnému fitu oedometrické zkoušky, ale i extrémně nadhodnoceným simulacím trojosých zkoušek. Výsledek srovnání této sady s automatickou kalibrací jsou na obr. 6.15a-c. Jak je vidět, tak výsledky simulací chování při porušení jsou realističtější než v případě první verze kalibrační aplikace. Tyto simulace se blíží kalibracím ručním, stejně jako v případě simulace oedometrické zkoušky. Simulace oedometrické zkoušky není zcela ideální, nicméně v rámci experimentálních chyb. Simulace experimentální sady Rohatec druhou verzí kalibrační aplikace byla v zásadě úspěšná, i když výsledek této simulace je jeden z horších výsledků, podobně jako v první verzi.

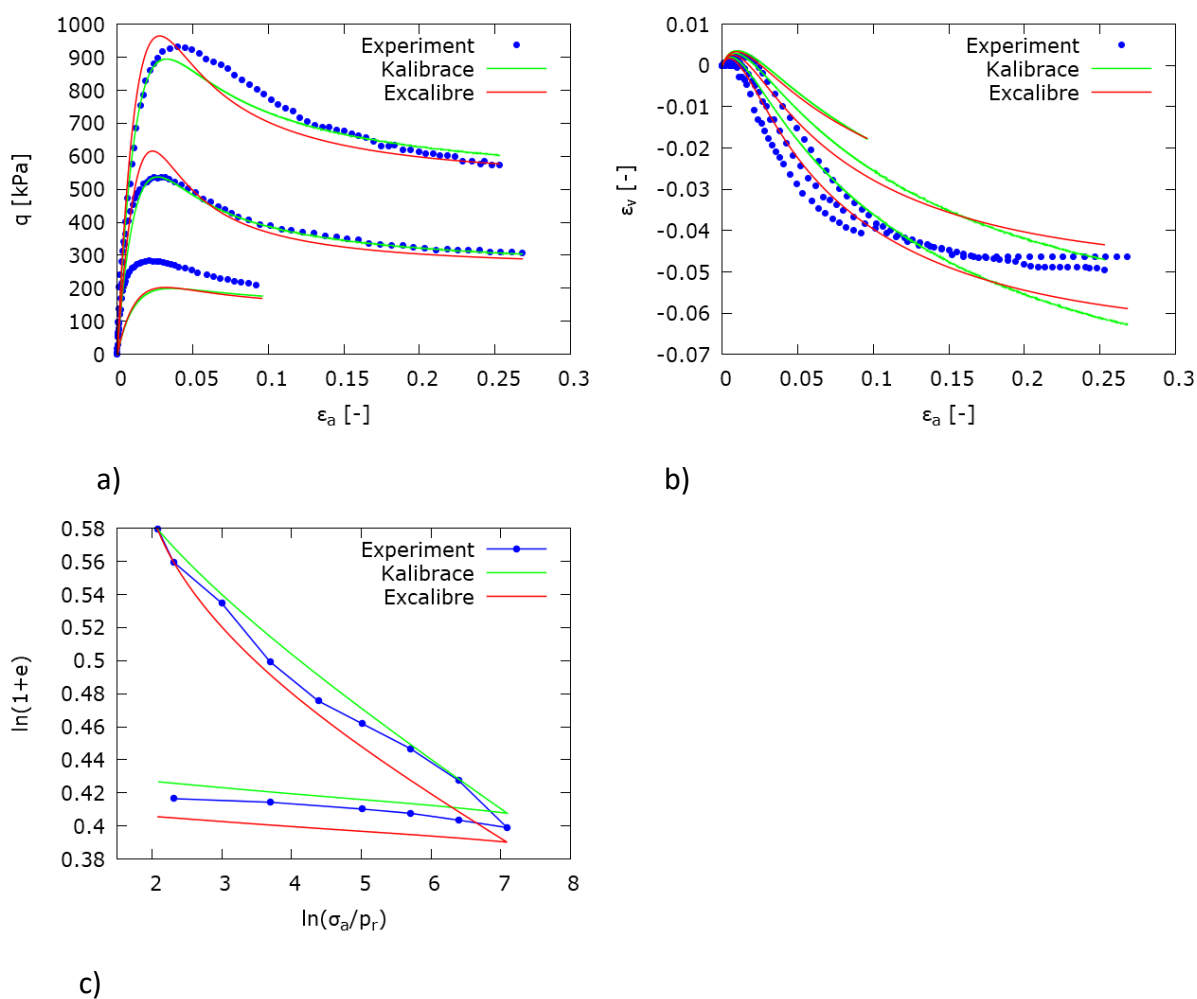


Obr. 6.15: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Rohatec druhé verze, a) a b) drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku

Následující komentovanou sadou byla sada experimentálních dat Kralupy, jež v první verzi kalibrační aplikace měla ideální fit oedometrické zkoušky. Výsledky automatické kalibrace jsou k vidění na obr. 6.16a-c. Z výsledků je patrné, že automatická kalibrace dopadla úspěšně, výsledky se blíží ruční kalibraci i experimentálním výsledkům. Na obr. 6.16a je představen výsledek simulace trojosých zkoušek v zobrazení q vůči ϵ_a . Může se zdát, že kalibrační aplikace lehce nadhodnotila vrcholový stav, ale tento dojem je způsoben problémem jedné parametrické sady pro všechny experimentální testy. Kalibrační aplikace se řídí vstupem a experimentálními daty, která se snaží ideálně fitovat a to včetně experimentálních chyb, které jsou v sadách zaneseny. Není možné širokou experimentální sadu kalibrovat se stoprocentní přesností. Jinými slovy během kalibrace dochází a musí dojít k jistému kompromisu, kdy se uživatel rozhodne, co je pro něj příznivější. Z tohoto důvodu jsou v simulacích trojosých zkoušek odchylky mezi kalibrací automatickou a ruční. I proto má uživatel výsledné kalibrační aplikace právo zasáhnout do výsledné kalibrace úpravou

výsledných parametrů, kde uživatel může přehodnocený vrcholový stav trojosých zkoušek pro sadu Hrušovany upravit snížením parametrů modelu α a β .

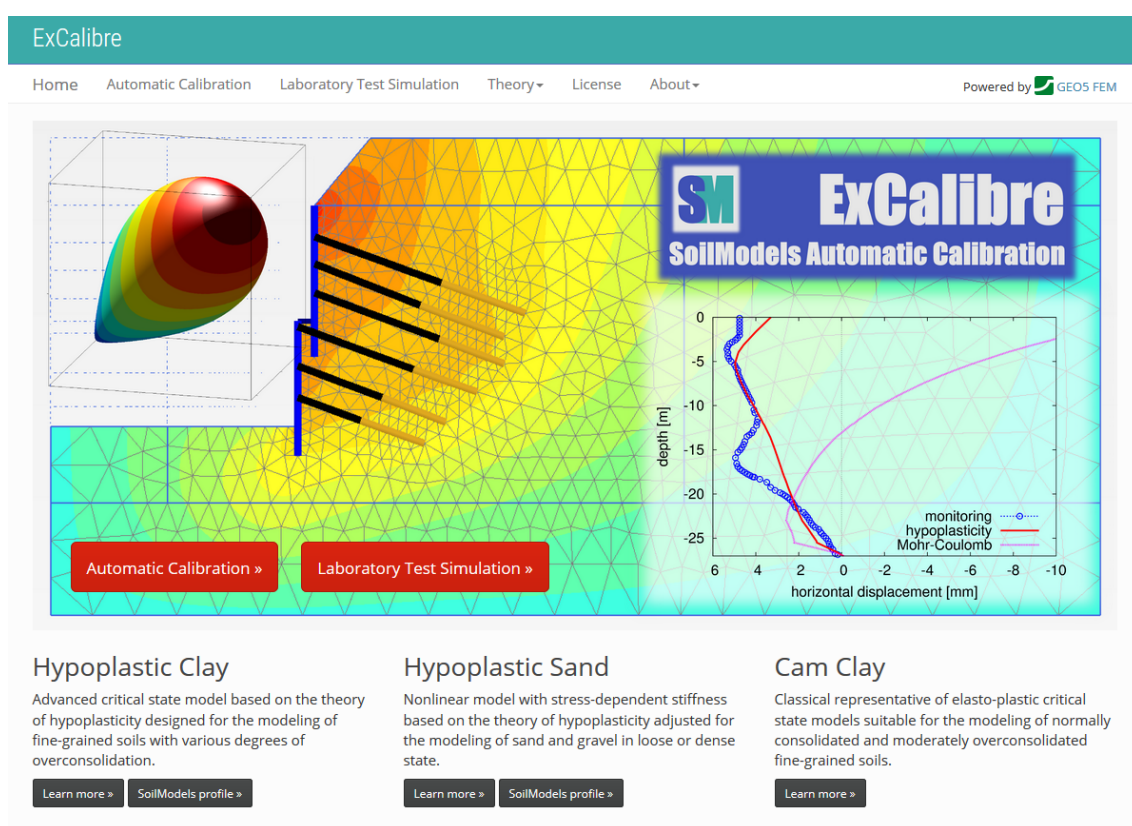
Z výsledků automatických simulací druhé verze kalibrační aplikace se ukázalo, že aplikace HypoSand funguje dle pravidel kalibrace konstitučního modelu pro hrubozrnné materiály (kap. 3.2) a je tedy nástrojem, který bude do budoucna pomáhat v užívání konstitučního modelu pro hrubozrnné zeminy. V této fázi měla kalibrační aplikace pro hrubozrnné materiály pouze jediný nedostatek, který představuje kalibrace experimentální sady po částech (dle oedometrických zkoušek) a ne jako celek. Tento problém byl kolegům, kteří finální aplikaci ladili a v konečné fázi i přepsali do jazyka C#, představen a ve výsledné verzi kalibrační aplikace je experimentální sada kalibrována jako celek (více v kap. 6.3).



Obr. 6.16: Výsledky srovnání ručně kalibrované a automaticky kalibrované sady Hrušovany druhé verze, a) a b) drénované trojosé zkoušky na rekonstituovaných vzorcích, c) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku

6.3 Finální verze kalibrační aplikace

Výsledná kalibrační aplikace, jež by měla simulovat jakoukoliv komplexní experimentální sadu pouze jednou sadou parametrů díky vybranému hypoplastickému modelu, byla z interpretačního programovacího jazyka Matlab přepsána do jazyka C#, díky kterému je dnes přístupná jako velmi uživatelsky příjemná webová aplikace na soilmodels.com/excalibre/ (obr. 6.17). Tato webová aplikace vznikla spojením obou částí kalibrační aplikace (HypoClay a HypoSand) a umožňuje tedy použití obou hypoplastických modelů pro nasycené vzorky zemin. Výběr konstitučního modelu je v rukách uživatele, který chce výslednou aplikaci použít. To umožňuje použít hypoplastický model pro nasycené jíly na experimentální sadu hrubozrnného vzorku a naopak.



Obr. 6.17: Vzhled úvodní stránky aplikace ExCalibre

Inputem aplikace jsou samozřejmě data z laboratorních experimentů. Tato data musí být aplikaci předána ve správném formátu listů v souboru .xlsx, kde každý experiment je na vlastním listu, jehož název určuje druh laboratorní zkoušky. Zároveň při větším počtu stejných experimentů jsou rozlišeny čísla. Číslování experimentů začíná od jedné a nesmí být přeskokována. Pokud uživatel nahraje sadu experimentálních dat, kde bude mít označenou první nedrénovanou triaxiální zkoušku číslem 1 a druhou číslem 3, bude aplikace po uživateli vyžadovat změnu formátu číslování experimentů. Správný formát experimentálních sad je v rámci aplikace ke stažení v podobě šablony, do které lze vložit experimentální data a danou šablonu jednoduše nahrát do připraveného načítacího input boxu. Během nahrávání

souboru je tedy formát šablony zkontrolován. Kontrola se týká i samotných dat, kde může dojít k chybám při vložení do šablony, v takovém případě aplikace uživatele upozorní např. na prázdné buňky na označeném listu. Na stránce, kde se vkládají data, je potřeba vybrat hypoplastický model, který chce uživatel použít. Vzhled stránky pro vložení dat je vidět na obr. 6.18.

Po úspěšném nahrání experimentálních dat a volbě modelu, jsou tato data odeslána na server, kde proběhne výpočet kalibrace. O jejím průběhu je uživatel informován informačními zprávami (obr. 6.19).

Obr. 6.18: Vzhled stránky pro nahrání dat aplikace ExCalibre

Obr. 6.19: Průběh kalibrace experimentální sady v aplikaci ExCalibre

V momentě, kdy jsou experimentální data nakalibrována, je sada parametrů uživateli představena. Zároveň je možné si na výsledné stránce kalibrace prohlédnout experimentální data proložená grafy, které jsou reprodukcí modelu za použití představených parametrů, podobně jako v případě ručních kalibrací. Uživatel však má do výsledné kalibrace možnost zasáhnout úpravou parametrů, kdy nakalibrovaná sada parametrů může být použita jako odhad a její doladění může uživatel provést v okně „Recalculate“ (pravá strana stránky s parametry). V této sekci si může uživatel aplikace simulace doladit dle svých představ (obr. 6.20). Výhodné je, že při použití okna re-kalibrace jsou do grafů s experimentálními daty přidány nové křivky, které představují simulaci modelu při použití sady parametrů z funkce rekalkulace. Uživatel tedy může svou upravenou sadu parametrů porovnat s výsledky z kalibrační aplikace a rozhodnout se, který fit experimentálních dat je pro něj výhodnější. Uživatel má i možnost upravit si počáteční čísla pórovitosti pro jednotlivé experimentální zkoušky, která jsou důležitou součástí vstupních dat do aplikace.

Automatic Calibration
Input file: _bilinska_delta_49703

Model parameters: OED-REC-1 OED-NAT-1 CIUP-REC-1 CIUP-REC-2 CIUP-REC-3 CIUP-NAT-1 CIUP-NAT-2 CIUP-NAT-3

Calibrated model parameters		Parameters for recalculation	
Material model	Hypoplastic Clay	Material model	Hypoplastic Clay
Parameter N	N = 0.838 [-]	Parameter N	N = 0.838 [-]
Slope of primary loading line	$\lambda^* = 0.062$ [-]	Slope of primary loading line	$\lambda^* = 0.062$ [-]
Slope of unloading line	$\kappa^* = 0.011$ [-]	Slope of unloading line	$\kappa^* = 0.011$ [-]
Critical friction angle	$\varphi_c = 24.2$ [°]	Critical friction angle	$\varphi_c = 24.2$ [°]
Poisson's ratio	$\nu = 0.25$ [-]	Poisson's ratio	$\nu = 0.25$ [-]
Initial void ratio		Initial void ratio	
CIUP-REC-1	0.538 [-]	CIUP-REC-1	0.538 [-]
CIUP-REC-2	0.501 [-]	CIUP-REC-2	0.501 [-]
CIUP-REC-3	0.417 [-]	CIUP-REC-3	0.417 [-]
CIUP-NAT-1	0.501 [-]	CIUP-NAT-1	0.501 [-]
CIUP-NAT-2	0.469 [-]	CIUP-NAT-2	0.469 [-]
CIUP-NAT-3	0.415 [-]	CIUP-NAT-3	0.415 [-]
OED-REC-1	0.869 [-]	OED-REC-1	0.869 [-]
OED-NAT-1	0.568 [-]	OED-NAT-1	0.568 [-]

Recalculate

Obr. 6.20: Vzhled stránky s nakalibrovanými parametry z aplikace ExCalibre a oknem s možností re-kalibrace modelu

Výsledky kalibrace si lze na jednotlivých listech, představujících laboratorní experimenty vložené do kalibrační aplikace, prohlédnout (obr. 6.21a-d). V rámci ukázky kalibrační aplikace byla použita experimentální sada Bílina 49703. Jak je z obr. 6.21 vidět, tak je experimentální sada charakterizována pomocí modelu jako celek, nikoliv po částech jako v případě aplikací HypoClay a HypoSand, které byly testovány v první a druhé fázi ověření funkčnosti kalibrační aplikace.



Obr. 6.21: Ukázka vzhledu graficky vyjádřené kalibrace v proložených experimentálních datech, a) oedometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku, b) oedometrických zkouška na neporušeném vzorku, c) nedrénovaná triaxiální zkouška na rekonstituovaném vzorku, d) nedrénovaná triaxiální zkouška na neporušeném vzorku

Zajímavou součástí aplikace ExCalibre je i část „Laboratory Test Simulation“ (obr. 6.22), kde si uživatel může na základě zvoleného hypoplastického modelu, parametrické sady, počátečních stavů a druhu testu zkusit, jak se daný hypoplastický chová na základě změny příslušného parametru. Tato část webové aplikace má obdobnou funkčnost jako software „Triax element test driver“ (soilmodels.com/triax/), která byla pro základní typy laboratorních zkoušek v této práci používána pro všechny ruční kalibrace.

ExCalibre

Home
Automatic Calibration
Laboratory Test Simulation
Theory
License
About

Powered by
GEOS FEM

Laboratory Test Simulation

1. Model
2. Laboratory Test
3. Initial State

Material model

Hypoplastic Clay

Parameter N

N = 1

[-]

Slope of primary loading line

$\lambda^* = 0.1$

[-]

Slope of unloading line

$\lambda^* = 0.01$

[-]

Critical friction angle

$\varphi_c = 25$

[°]

Poisson's ratio

$\nu = 0.2$

[-]

Obr. 6.22: Vzhled stránky pro simulaci laboratorních experimentů, která je součástí aplikace ExCalibre

Součástí webové aplikace je také teoretická část, kde má uživatel možnost dozvědět se více o používaných konstitučních modelech pro automatické kalibrace. ExCalibre je v dnešní podobě velmi uživatelsky příjemná webová aplikace, která má za cíl zjednodušit použití hypoplastických modelů pro praktické účely. Výsledná kalibrační aplikace ExCalibre kalibruje vloženou experimentální sadu jako celek a uživateli předá pouze jednu sadu parametrů, kterou může okamžitě použít do svých budoucích geotechnických modelů.

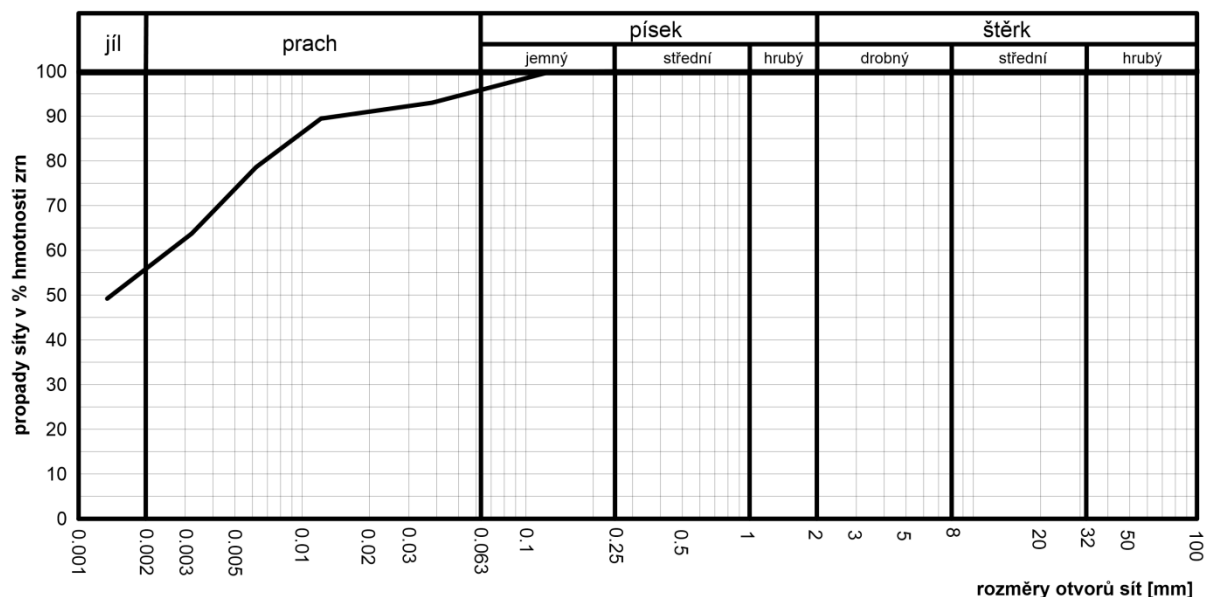
7 KALIBRACE NA ZÁKLADĚ VLASTNÍCH EXPERIMENTÁLNÍCH DAT

Pro vývoj kalibrační aplikace práce bylo potřeba zhotovit laboratorní experimenty na neporušených vzorcích tuhého jílu z výsypek v Bílině, na nichž byla měřena tuhost v oboru malých a velmi malých přetvoření. Tyto laboratorní experimenty rozšířily experimentální sadu Bílina s označením 49714.

7.1 Laboratorní experimenty na vzorku Bílina

Jak již bylo zmíněno, tak neporušené vzorky, použité k laboratorním experimentům, pocházející z výsypek z Bíliny, měly charakter tuhého až pevného jílu tmavě hnědé až šedé barvy. Tyto vzorky obsahovaly přibližně 95% jemné frakce (54% jílových a 41% prachových částic) a 5% jemného písku. Vzorky pro uvedené laboratorní experimenty se vyznačovaly občasným výskytem uhelných vloček. Zrnitostní křivka je vyobrazena na obr. 7.1. Mez tekutosti vzorku Bílina 49714 byla stanovena na 64% a mez plasticity na 30,5%.

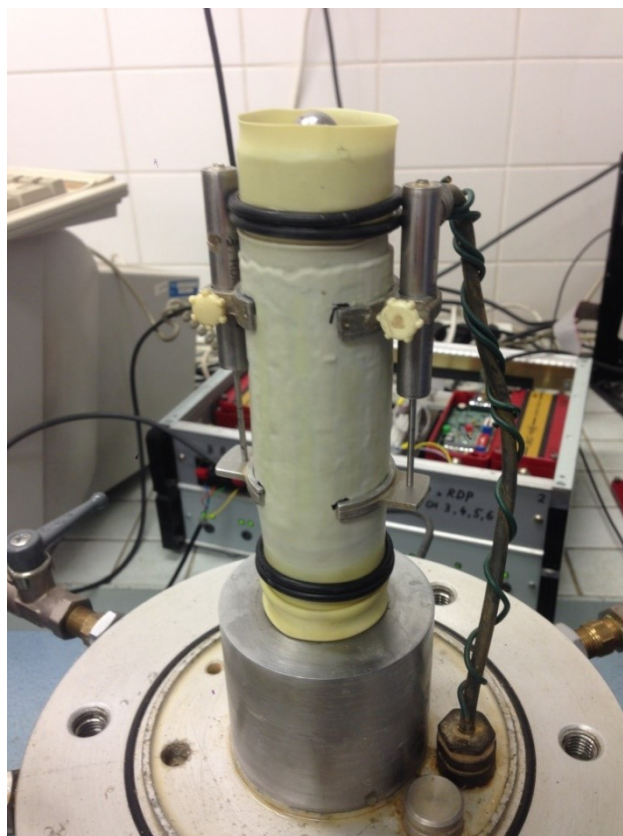
Příprava vzorků na zkoušku obsahovala jejich osazení do komor, které se následně plnily vodou pro realizaci všesměrného napětí na vzorek pomocí tlakové pumpy. Další tlaková pumpa zajišťovala sycení vzorku. Celkem byly zhotoveny dva laboratorní experimenty: smyková trojosá zkouška s lokálními snímači deformace LVDT, zajišťujícími měření malých deformací a zkouška na vzorku osazeného piezometrickými snímači (vysílačem a přijímačem) smykových vln, tzv. bender elementy.



Obr. 7.1: Zrnitostní křivka vzorku Bílina 49714

7.1.1 Trojosá zkouška se snímači LVDT

Smyslem této triaxiální zkoušky bylo měřit smykovou tuhost vzorku v závislosti na přetvoření v oboru malých přetvoření. Pro měření těchto deformací (v rozmezí do 10^{-3} %) je vzorek osazen speciálními snímači, které zaznamenávají posun v rámci vzorku. Tyto snímače se označují jako LVDT a jsou osazeny přímo na vzorku v komoře, jak je vidět na obr. 7.2.



Obr. 7.2: Vzorek Bílina 49714 osazený v komoře s LVDT snímači

Vzorek byl sycen tlakem 300 kPa ze spodní podstavy destilovanou vodou z tlakové pumpy. Destilovaná voda byla do vzorku rozváděna pomocí filtračních papírů na horní a spodní podstavě vzorku a pomocí filtračního papíru na plášti vzorku. Sycení vzorku celkově trvalo přibližně 2 měsíce, přičemž přibližně po měsíci sycení byl zvýšen syticí tlak na 500 kPa. Plné nasycení vzorku bylo ověřeno díky B-testu (B-check test), jehož výsledek byl 0,96. Podle Skemptonova (1954) je tento test popsán rovnicí:

$$(7.1) \quad B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_r}$$

Kde Δu je přírůstek (změna) pórového tlaku a $\Delta \sigma_r$ je přírůstek radiálního napětí resp. tlaku v komoře. Tato rovnice říká, že při změně komorového tlaku vznikne přírůstek radiálního napětí působícího na vzorek, který zároveň vyvolá změnu pórového tlaku, jsou-li tyto veličiny rovnocenné, tak je, díky Terzaghiho principu efektivních napětí, stupeň nasycení daného

vzorku je roven 1. Jinými slovy je vzorek zcela nasycen. Tímto jednoduchým testem se dá nasycení vzorku rychle a lehce ověřit.

Po zdárném nasycení vzorku přišla na řadu smyková zkouška. Před samotným smykáním vzorku je třeba stanovit efektivní napětí, při kterém vzorek bude smykán, to bylo určeno na 400 kPa. Aby bylo docíleno efektivního napětí 400 kPa bylo třeba vyvolat v komoře tlak 900 kPa. Toto napětí je napětí totální. Po vyvolání potřebného komorového tlaku je třeba nechat vzorek zkonsolidovat. Velmi důležitým parametrem úspěšné trojosé zkoušky je rychlost smykání. Rychlost smykování byla stanovena dle normy ČSN CEN ISO/TS 17892-9 (2005) a pro tento účel byl proveden první konsolidační stupeň určen 560 kPa v komoře, resp. skoková změna efektivního napětí o 50 kPa (během sycení vzorku byl ponechán komorový tlak o 10 kPa vyšší než tlak sytící). Po konsolidaci vzorku v tomto prvním konsolidačním stupni byl ze závislosti změny výšky vzorku s časem určen parametr t_{50} , který vyjadřuje čas 50 % konsolidace vzorku. Pomocí parametru t_{50} je možné dle empirických rovnic odvodit rychlost smykání.

Po vyhodnocení prvního konsolidačního stupně bylo třeba vzorek zatížit na požadovaných 900 kPa. Je třeba brát na vědomí, že není možné vzorek zatížit skokově o 400 kPa, jelikož by došlo k nerovnoměrné konsolidaci a narušení struktury vzorku. Nerovnoměrná konsolidace a porušení struktury vzorku by později znemožnilo získat z experimentu plnohodnotná data (slovní sdělení Mohyla, 2017). Aby k těmto problémům nedošlo, byl vzorek zatěžován postupně. Postupné zatěžování vzorku dovoluje postupnou konsolidaci vzorku a tento zatěžovací stupeň trval přibližně týden.

Pro samotnou zatěžovací zkoušku byla určena rychlost smykání nebo zatěžování dle normy ČSN CEN ISO/TS 17892-9 (2005) na 0,0001 mm/min. Po ukončení smykové zkoušky, která trvala přibližně týden, byl vzorek vyjmut z komory, zvážen a poté po dobu 24h sušen při teplotě okolo 100-110 °C pro vyhodnocení jeho vlhkosti, čísla pórovitosti a stupně nasycení. Uvedené výsledné veličiny jsou uvedeny v tabulce 7.1. Charakter usmýknutí vzorku Bílina je patrný z obr. 7.3.

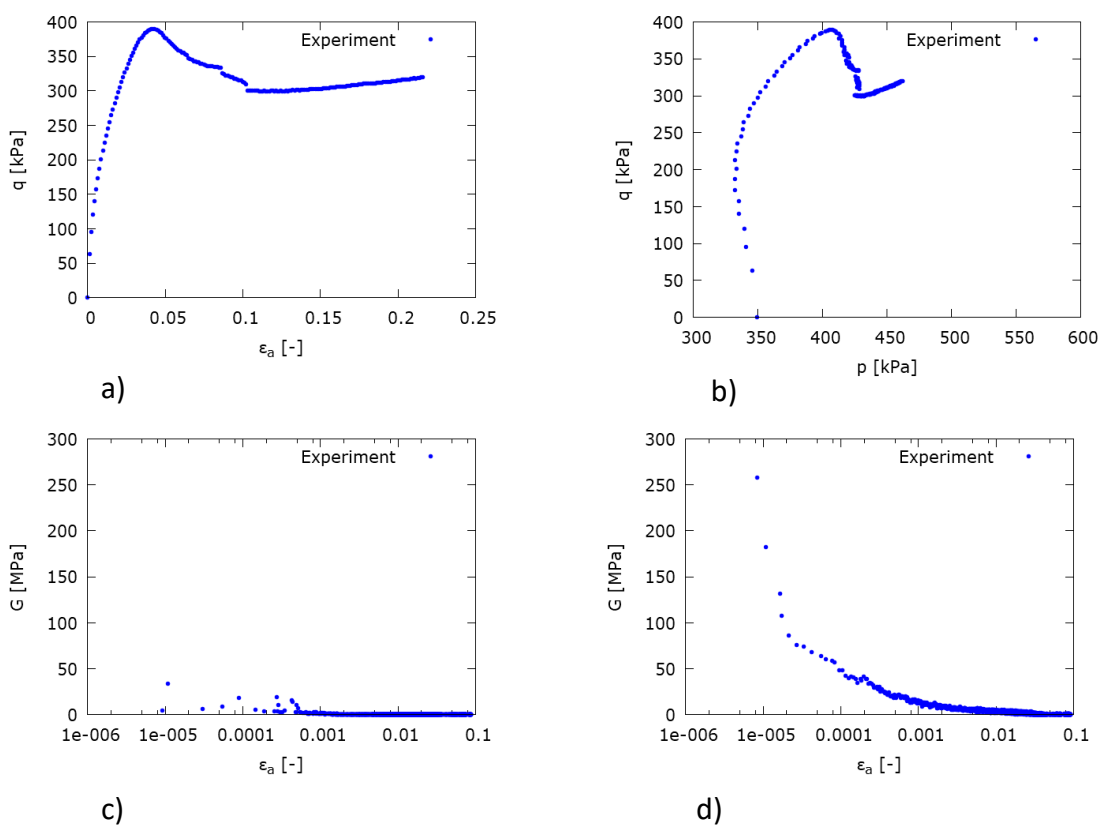
Experimentální data naměřená během trojosé zkoušky byla následně vyhodnocena a jejich výsledky jsou na obr. 7.4a-d. Tato data posloužila jako vstup pro kalibraci hypoplastického modelu s konceptem intergranulárních přetvoření.

Tabulka 7.1: Výsledky z trojosé zkoušky s LVDT

Vlhkost [%]	Pórovitost [%]	Číslo pórovitosti [-]	Stupeň nasycení [%]
20,84	32,35	0,478189	100



Obr. 7.3: Vzorek Bílina po dokončení trojosé zkoušky a vysušení



Obr. 7.4: Výsledky trojosé zkoušky s LVDT snímači, a) experimentální data trojosé zkoušky s LVDT snímači q vůči ϵ_a , b) experimentální data trojosé zkoušky s LVDT snímači q vůči p , c) experimentální data pro měření 1. snímače LVDT, d) experimentální data pro měření 2. snímače LVDT

7.1.2 Zkouška za použití bender elementů

Druhou zkouškou, která byla v rámci diplomové práce zhotovena, byla laboratorní zkouška za použití tzv. bender elementů. Podle Rotta a Mašína (2012) se jedná o piezokeramické snímače, které reagují na průchod vlny, která je vyvolávána osciloskopem a vysílána skrze vzorek pomocí elementu na jedné straně vzorku. Průchod vyslané vlny je zaznamenáván druhým elementem na opačné straně vzorku a je tedy zaznamenán čas průchodu vlny skrze vzorek. Díky znalosti vzdálenosti, kterou vlna při průchodu vzorkem urazila, a času průchodu vlny lze určit rychlost vlny, pomocí které lze určit smykový modul dle rovnice:

$$(7.2) \quad v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

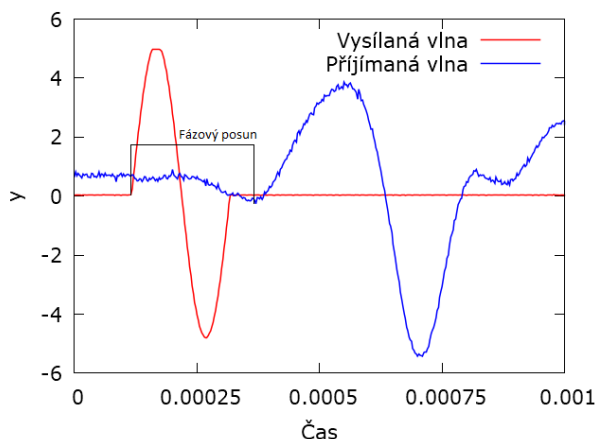
Kde v_s je rychlost smykové vlny, G je smykový modul ve vertikálním směru a ρ je hustota vzorku.

Podobně jako v případě trojosé zkoušky byl neporušený vzorek z výsypky Bílina pečlivě změřen (výška a průměr podstavy) a poté osazen do komory s bender elementy. Komora byla zaplněna vodou a postupně tlakována na 310 kPa (sytící tlak 300 kPa). Vzorek se nechal sytit. I přesto, že vzorek pro bender elementy byl menší výšky, tak jeho syčení trvalo přibližně 2 měsíce, jako v případě trojosé zkoušky s LVDT (kap. 7.1.1). Během syčení vzorku byl sytící tlak zvýšen na 500 kPa (při tlaku v komoře 510 kPa). Nasycenost vzorku byla jako v případě trojosé zkoušky ověřena díky B-testu, jehož výsledek byl stanoven na 0,96.

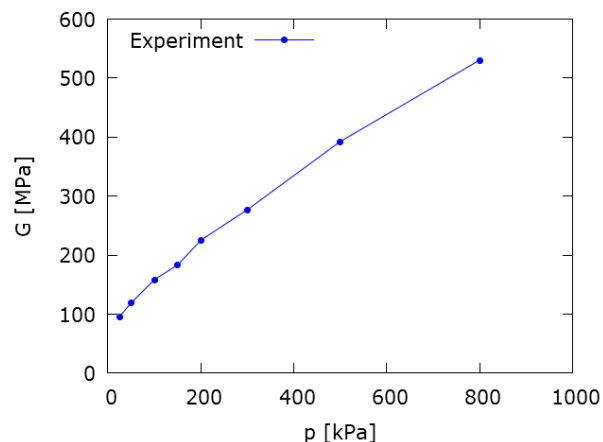
Po dosycení vzorku přišlo na řadu samotné měření smykového modulu. Tato měření jsou prováděna za různých zatížení (různých středních napětí), pro naše účely bylo zvoleno 8 stupňů zatížení, a to: 25, 50, 100, 150, 200, 300, 500, 800 kPa. Pro všechny uvedené stupně zatížení musel být vzorek plně zkonsolidován a jeho změny objemu (rozměrů) musely být pečlivě zaznamenávány – jelikož bender elementy jsou osazeny na podstavách vzorku a vzdálenost mezi nimi je potřebná k výpočtu rychlosti vlny. Do výpočtu rychlosti smykové vlny pro dané zatížení je třeba zanést přiblížení elementů způsobené zatížením a následnou konsolidací vzorku.

Samotné měření času průchodu vlny proběhlo nezávisle pro osm fází postupně, kde pomocí osciloskopu byly emitovány vlny několika frekvencí, a to: 2, 5, 7, 10, 12 a 15 kHz. Samotný čas průchodu vlny byl odečten z fázového posunu vysílané vlny, jež byla zachycena na přijímacím elementu (obr. 7.5) pro každou zmíněnou frekvenci samostatně. Tento postup je důležitý, jelikož nelze předpokládat, že jedna zvolená frekvence bude reprezentativní pro všechny fáze zatížení vzorku. Proto se pro každý stupeň zatížení udělala sada několika měření zmíněných frekvencí, pro které byl čas průchodu vlny vzorkem vyhodnocen. Čas potřebný pro průchod smykové vlny přes vzorek by se v rámci experimentální chyby neměl lišit ve všech frekvencích a pro vyhodnocení smykového modulu jsou preferovanější vyšší frekvence (slovní sdělení Mohyla, 2017).

Výsledkem těchto měření je křivka popisující závislost smykové tuhosti na středním napětí, jež je vyobrazena na obr. 7.6.



Obr. 7.5: Ukázka fázového posunu vysílané a přijímané vlny skrze vzorek



Obr. 7.6: Experimentální data z testu s bender elementy

7.2 Kalibrace konstitučního modelu pro obor velmi malých přetvoření

Koncept intergranulárních přetvoření byl poprvé představen Niemunísem a Herlem (1997). Tento koncept slouží především jako nástavba konstitučních modelů k predikcím nelineárního poklesu tuhosti s deformací v oboru malých přetvoření, akumulace napětí či přetvoření při experimentech cyklického zatěžování a cyklické hystreze. Tento koncept lze použít v kombinaci jak s konstitučním hypoplastickým modelem pro písky, tak i pro jíly.

Konstituční hypoplastický model se zabudovaným konceptem integrulárních přetvoření pro jíly byl vyvinut Mašínem (2014). Základem tohoto modelu je hypoplastický model pro nasycené jíly (Mašín, 2013a) pro predikce mechanického chování v oboru velkých přetvoření. Model od Mašína (2014) tvoří jeho nástavbu pro simulace v oboru malých přetvoření a velmi malých přetvoření.

Tento model pro svou plnou definici vyžaduje nejen původních 5 parametrů pro model popsany v kap. 2.1, ale je do něj přidáno dalších 6 parametrů pro definici konceptu intergranulárních přetvoření. Nově přidané parametry budou v následující sekci popsány.

Parametry A_g a n_g kontrolují počáteční smykovou tuhost v oboru velmi malých přetvoření pomocí experimentu šíření smykových vln skrze vzorek zeminy, tzv. zkouška s bender elementy (kap. 7.1.2). Tyto dva parametry lze kalibrovat přímo díky rovnici:

$$(7.3) \quad G_0 = A_g \left(\frac{p}{p_r} \right)^{n_g}$$

Kde G_0 je počáteční smyková tuhost, p aktuální střední napětí, p_r je referenční střední napětí 1 kPa a A_g a n_g jsou parametry modelu.

Kalibrace těchto dvou parametrů lze provést díky generaci vektoru středních napětí, které v rovnici 7.3 působí jako nezávislá proměnná, a na základě zvolených parametrů A_g a n_g spočítat vektor počátečních smykových tuhostí, které lze následně proložit s experimentálními výsledky ze zkoušky s bender elementy.

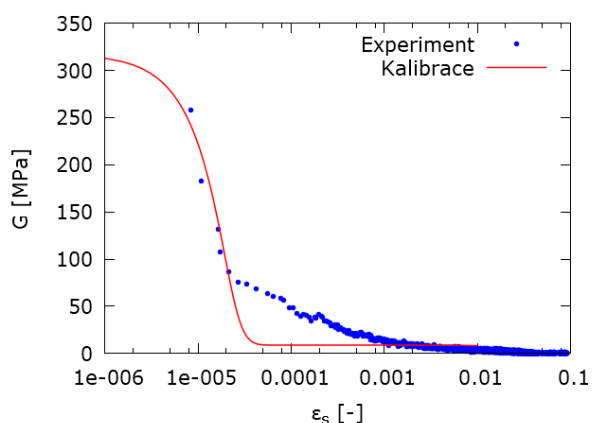
Parametr m_{rat} představuje poměr G_{90}/G_0 , kde G_{90} je počáteční smyková tuhost po změně dráhy přetvoření o 90° . Tato počáteční smyková tuhosti je bohužel těžce laboratorně stanovitelná a nelze ji určit za pomoci zkoušek s bender elementy, jako v případě G_0 , proto je m_{rat} složitě kalibrovatelné. Parametr m_{rat} je zaveden empiricky jako $m_{rat} \approx 0,7$.

Posledními třemi parametry jsou R , β_r a χ . Tyto parametry jsou kalibrovány pomocí fitování s experimentálními daty z triaxiální zkoušky s lokálními snímači deformace LVDT, sloužící k měření tuhosti v oboru malých přetvoření (kap. 7.1.1). Kalibrace probíhá v rovině G vůči ε_s . Parametr R reprezentuje velikost rozsahu elastických přetvoření. Tento parametr v konečném důsledku ovlivňuje snižující se tuhost s přibývajícím přetvořením. Podobný vliv jako parametr R má i β_r . Tento parametr řídí horizontální složku křivky klesající tuhosti s přetvořením, resp. posouvá křivku snižující se tuhosti s přetvořením a určuje tedy, kdy dochází k razantnímu poklesu tuhosti. Poslední parametr χ ovlivňuje směrnici křivky snižující se tuhosti s přetvořením a řídí tedy rychlost jejího snížení (Mašín, 2014; Mašín, 2017b).

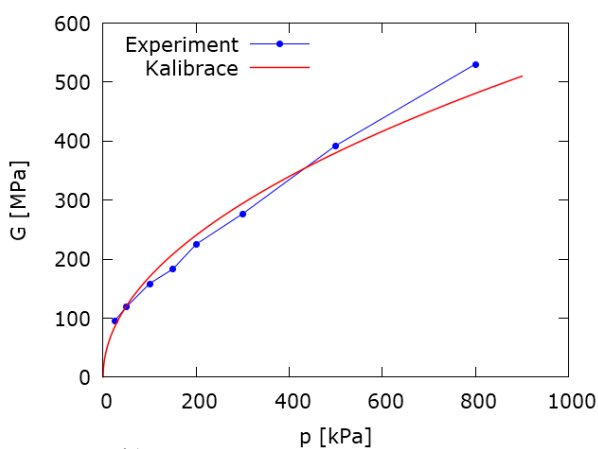
Popsaným modelem byla kalibrována experimentální data z kap. 7.1. Jak je vidět na obr. 7.4c, tak měření 1. snímače LVDT, osazeného na vzorku, nebylo příliš úspěšné. Z tohoto důvodu byla pro kalibraci použita pouze experimentální data z měření 2. snímače LVDT. Celá parametrická sada je poté seskupena v tabulce 7.2, výsledky kalibrace jsou vyobrazeny v obr. 7.7a a 7.7b.

Tabulka 7.2: Parametry pro vzorek Bílina 49714 pro měření tuhosti v oboru malých def.

φ_c	λ	κ	N	ν	R	β_r	χ	A_g	n_g	m_{rat}
24	0,0636	0,023	0,88	0,17	0,00003	5	1,3	17000	0,5	0,7



a)



b)

Obr. 7.7: Výsledky kalibrace hypoplastického modelu pro jíly s konceptem intergranulárních přetvoření, a) měření 2. LVDT snímače, b) zkouška při použití bender elementů

8 ZÁVĚR

V této práci jsem představil kalibrační aplikaci ExCalibre, která umožňuje rychlé kalibrování hypoplastických konstitučních modelů, určené buď pro jemnozrnné, nebo hrubozrnné vzorky zemin. Aplikace ExCalibre byla vyvinuta na Stavební fakultě, ČVUT a dnes je dostupná k použití na soilmodels.com/excalibre/. V této práci jsem aplikaci popsal a otestoval její funkcionalitu v několika fázích, které přispěly k její konečné podobě.

Jak se ukazuje, tak kalibrace konstitučních hypoplastických modelů je nejen poměrně nesnadnou záležitostí, ale zároveň je bez ní nemožné nasimulovat geotechnický problém. Kalibrační procedura konstitučních hypoplastických modelů je v práci popsána, společně s obecnou filozofií hypoplastických modelů. Kalibrační procedura modelu je proces, kdy je snaha o získání parametrické sady pro daný model, díky které lze charakterizovat mechanické chování vzorku zeminy. K této charakterizaci je důležité mít určitou komplexní sadu experimentálních dat pro daný vzorek zeminy. Jelikož má aplikace tuto proceduru simulovat a provést ji tak, jako by ji měl provést uživatel modelu, byla pro účely testování aplikace ručně kalibrována databáze experimentálních dat pro jemnozrnné a hrubozrnné vzorky zemin. Ručně kalibrované sady byly porovnávány s výsledky kalibrační aplikace a na základě odchylek bylo upozorněno na problémy, které se v kalibrační aplikaci vyskytovaly.

V rámci práce jsem rozšířil databázi jemnozrnných sad zemin, které byly použity pro testování robustnosti kalibrační aplikace. Rozšiřující sady experimentálních dat jsem zároveň popsal v této práci.

V rámci práce jsem zhotovil experimentální zkoušky na vzorku jemnozrnné zeminy z bílinských výsypek, jejichž metodiku jsem v práci popsal a jejich výsledky v práci představil. Na základě zhotovených laboratorních experimentů jsem nakalibroval hypoplastický model s konceptem integranulárních přetvoření určený pro jemnozrnné zeminy. Význam a kalibrace tohoto modelu společně s konceptem integranulárních přetvoření jsem v práci popsal a představil parametry modelu společně s jejich významem.

9 POUŽITÉ ZDROJE

ČSN CEN ISO/TS 17892-9. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 9: Konsolidovaná triaxiální zkouška vodou nasycených zemin*. Praha: Český normalizační institut, 2005.

HENKEL, D. J. The Effect of Overconsolidation on the Behaviour of Clays During Shear. *Géotechnique*. 1956, **6**(4), 139-150.

HERLE, Ivo a Gerd GUDEHUS. Determination of parameters of a hypoplastic constitutive model from properties of grain assemblies. *Mechanics of cohesive-frictional materials*. 1999, **4**, 461-486.

HERLE, Ivo. *Základy matematického modelování v geomechanice*. Praha: Karolinum, 2003. Učební texty (Univerzita Karlova). ISBN 978-80-246-0745-0.

HERLE, Ivo, David MAŠÍN, Vladislava KOSTKANOVÁ, Christian KARCHER a Dieter DAHMEN. Experimental investigation and theoretical modelling of soft soils from mining deposits. *Proceedings of the 5th international symposium on deformation characteristics of geomaterials*. Seoul, Korea, 2011, (2), 858-864.

CHAKROBORTY, Tanusree, Rodrigo SALGADO a Dimitrios LOUKIDIS. A two-surface plasticity model for clay. *Computers and Geotechnics*. 2013, **49**, 170-190.

KARSTUNEN, Minna a Mirva KOSKINEN. Plastic anisotropy of soft reconstituted clays. *Canadian Geotechnical Journal*. 2008, **45**(3), 314-328.

KOSKINEN, Mirva. *Plastic anisotropy and destruction of soft Finnish clays*. Helsinki, 2014. Dizertační práce. Aalto University. Vedoucí práce Leena Korkiala-Tanttu.

LADD, Charles C. a Julius VARALLYAY. *The influence of stress system on the behavior of saturated clays during undrained shear*. Cambridge: Dept. of Civil Engineering, 1965.

MAŠÍN, David. A hypoplastic constitutive model for clays. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2005, **29**(4), 400-410.

MAŠÍN, David, Jan BOHÁČ a Pavel TŮMA. Modelling of a deep excavation in a silty clay. *Proc. 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Athény, Řecko, 2011, (3), 1509-1514.

MAŠÍN, David. Clay hypoplasticity with explicitly defined asymptotic states. *Acta Geotechnica*. 2013a, (8), 481-496.

MAŠÍN, David. Double structure hydromechanical coupling formalism and a model for unsaturated expansive clays. *Engineering Geology*. 2013b, **165**, 73-88.

MAŠÍN, David. Clay hypoplasticity model including stiffness anisotropy. *Géotechnique*. 2014, **64**(3), 232-238.

MAŠÍN, David. Coupled thermohydromechanical double structure model for expansive soils. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*. 2017a, **143**(9).

MAŠÍN, David. *Hypoplasticity for practical applications: Course*. Vídeň: Technishe Universität Wien, 2017b.

NIEMUNIS, Andrzej a Ivo HERLE. Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*. 1997, **2**(4), 279 - 299.

PARRY, R. H. G. Triaxial Compression and Extension Tests on Remoulded Saturated Clay. *Géotechnique*. 1960, **10**(4), 166-180.

ROTT, Josef a David MAŠÍN. Anizotropie tuhosti jílů v oboru velmi malých přetvoření. *Geotechnika*. 2012, (4), 23-31.

SEAH, T. H. a K. C. LAI. Strength and deformation behavior of soft Bangkok clay. *Geotechnical Testing Journal*. 2003, **26**(4), 421-431.

SKEMPTON, Alec Westley. The Pore-pressure coefficients A and B. *Géotechnique*. 1954, (4), 143-147.

SUCHOMEL, R. a D. MAŠÍN. Probabilistic analyses of a strip footing on horizontally stratified sandy deposit using advanced constitutive model. *Computers and Geotechnics*. 2011, **38**(3), 363-374.

SURARAK, Chanaton, Suched LIKITLERSUANG, Dariusz WANAWOWSKI, Arumugan BALASUBRAMANIAM, Erwin OH a Hong GUAN. Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and stiff Bangkok clays. *Soils and Foundations*. 2012, **54**(4), 682-697.

YANG, Chao, Jonh C. CARTER, Daichao SHENG a Scott W. SLOAN. An isotach elastoplastic constitutive model for natural soft clays. *Computer and Geotechnics*. 2016, **77**, 134-155.

YIN, Jian-Hua a Jun-Gao ZHU. Measured and predicted time-dependent stress–strain behaviour of Hong Kong marine deposits. *Canadian Geotechnical Journal*. 1999, **36**(4), 760-766.

VON WOLFFERSDORFF, P. A. A hypoplastic relation for granular materials with predefined limit state surface. *Mechanics of cohesic-frictional materials*. 1996, **1**, 251-271.

WU, Wei a Dimitrios KOLYMBAS. Hypoplasticity then and now. *Constitutive modelling of granular materials*. 2000, 57-105.